

# **Desenvolvimento e implementação do processo de maquinagem química de ligas de titânio para turbinas e próteses**

*João Filipe Coelho de Carvalho Pinto*

## **Relatório do Projeto Final / Dissertação do MIEM**

Orientador no INEGI: Eng.º Rui Jorge Lemos Neto

Orientador na FEUP: Prof.ª Dr.ª Teresa Margarida Guerra Pereira Duarte



**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Fevereiro de 2015





# Resumo

Nos dias que correm, vivemos uma era em que uma grande crise assolou todo o globo. Crise essa que ninguém escapou, seja pessoa singular ou uma grande empresa. Hoje, mais do que nunca, a poupança impera. Por conseguinte, indústrias como a automóvel e aeronáutica buscam por materiais alternativos, sobretudo mais leves de modo a garantir melhores performances, que originarão uma redução no consumo de combustíveis e de emissão de gases poluentes. Aqui se insere o investimento realizado no desenvolvimento de componentes em aluminetos de titânio. Estes possuem características mecânicas ímpares, nomeadamente uma baixa massa volúmica.

O principal objetivo do presente trabalho consiste em desenvolver e implementar o processo de maquinagem química para ligas de titânio, nomeadamente aluminetos de titânio, em ambiente industrial. Tal processo é utilizado com o intuito de remover uma camada contaminada com oxigénio, designada por *alpha case*, que se forma na superfície das ligas à base de titânio durante o processo de *investment casting*. Este processo também é usado para o acabamento de turbinas com sobresspessura na zona das alhetas. Foram utilizadas duas soluções distintas, a primeira 4.5% HF - 7.5%  $HNO_3$  - 5% *Erkantol* - 83%  $H_2O$ , garantiu taxas de remoção de 0,12 g/min e 0.007 mm/min, para turbinas *net shape*, e 0.18 g/min e 0.014 mm/min em turbinas *near-net shape*. Enquanto que ao utilizar a solução 2% HF - 4%  $H_2SO_4$  - 3.5% NaCl - 90.5%  $H_2O$ , se obtiveram taxas de remoção de 0,10 g/min e de 0,008 mm/min, para turbinas *near-net shape*. Nos testes realizados com as duas soluções, realizaram-se medições de rugosidade antes e após maquinagem química, verificando-se um aumento da mesma em todas as turbinas. Entre as duas soluções, a solução 2% HF - 4%  $H_2SO_4$  - 3.5% NaCl - 90.5%  $H_2O$  foi a que apresentou melhores resultados, com um aumento de rugosidade de médio de 15.85%. Foi ainda realizado o controlo dimensional e análise de reatividade das turbinas maquinadas com a solução 4.5% HF - 7.5%  $HNO_3$  - 5% *Erkantol* - 83%  $H_2O$ , verificando-se que a remoção de material foi maioritariamente homogénea e que não existem vestígios da camada *alpha case* nas mesmas.

Paralelamente, realizou-se o projeto de dois moldes para a obtenção de pás de turbina em cera, destinados a serem utilizados no processo de fundição de precisão. O primeiro, projetado em estereolitografia, foi concretizado, tendo-se efetuado a injeção de ceras na mesma, obtendo as pás desejadas. Estas apresentaram boa qualidade, no entanto após controlo dimensional apresentaram ligeiros empenos devido à dificuldade relativa à sua extração. No que concerne ao segundo molde, em alumínio, destinado à injeção de cera em condições industriais, não foi concretizado por necessitar de validação de vazamento. Contudo, foi totalmente projetado, tendo sido inclusivé escolhidos e desenvolvidos componentes para integrar tal molde.



# Abstract

Nowadays, we live in an era when a major crisis struck across the globe. This crisis that no one escaped, whether natural person or a large company. Today, more than ever, the reigns savings. Consequently, industries such as automobile and aviation seek for alternative materials, especially lighter to ensure best performances, that result in a reduction in fuel consumption and greenhouse gas emissions. Here you insert the investment made in the development of titanium aluminides components. These have unique mechanical characteristics, particularly low density.

The main objective of this dissertation it is to develop and implement the chemical milling process for titanium alloys, mainly titanium aluminides, in an industrial environment. This process is used in order to remove a hard surface layer referred to as alpha case, which is formed on the surface of titanium alloys during the investment casting process as for the finish turbines with additional thickness in the area of the fins. Two different solutions were used in this process, the first 4.5% HF - 7.5%  $HNO_3$  - 5% *Erkantol* - 83%  $H_2O$  attained removal rates of 0.12 g/min and 0.007 mm/min to net shape turbines and 0.18 g/min and 0.014 mm/min to near-net shape turbines. While using the solution 2% HF - 4%  $H_2SO_4$  - 3.5% NaCl - 90.5%  $H_2O$  removal rates obtained up to 0.10 g/min and 0.008 mm/min for near-net shape turbines. In the tests with both solutions took place roughness measurements before and after etching, verifying an increase of the same on all turbines. Between the two solutions, a 2% HF - 4%  $H_2SO_4$  - 3.5% NaCl - 90.5%  $H_2O$  showed the best results, with an increase of roughness of 15.85%. Was also performed dimensional control and reactivity analysis of the turbines milled with the solution 4.5% HF - 7.5%  $HNO_3$  - 5% *Erkantol* - 83%  $H_2O$ , verifying that the removal of material is mostly homogenous and there are no traces of the alpha case layer on the turbines surface.

Similarly was made the design of two molds to obtain a wax turbine blade, to be used in the investment casting process. The first molding made by the stereolithography process was produced, having made the injection of wax, obtaining the desired blade. These blades showed good quality, however after a dimensional control showed a slight warping due to the difficulty on the extraction of the mold. With respect to the second molding, in aluminum, and intended for the wax injection under industrial conditions, it was not produced because requires casting validation in order to understand if it's necessary to put an offset in the turbine blade. However, it was completely designed and had been chosen and developed all the components that integrate the mold.



# Agradecimentos

Ao Eng.º Rui Neto, orientador no INEGI, pela oportunidade e privilégio de poder realizar esta dissertação, orientação, disponibilidade, troca de ideias, ensinamentos, incentivo e sobretudo pela forma amigável como sempre me tratou e confiança demonstrada em mim. Foi sem dúvida bastante enriquecedor poder aprender com alguém tão experiente.

À Prof.ª Teresa Duarte, orientadora na FEUP, o meu profundo agradecimento pelo acompanhamento, disponibilidade, apoio, incentivo, sugestões, conhecimentos transmitidos e amabilidade para comigo.

Ao INEGI por disponibilizar todos os meios necessários para a realização desta dissertação.

A toda a equipa do CETECOFF, nomeadamente Armanda Marques, Sertório Lares, Bárto Paiva, Fernando Seabra, Paulo Machado e Ricardo Paiva. O meu muito obrigado pela ajuda prestada, acompanhamento, disponibilidade, apoio, ensinamentos e companheirismo. O contato convosco foi bastante enriquecedor quer a nível profissional quer a nível pessoal.

À ZCP, pela possibilidade de realizar parte significativa do procedimento experimental e por oferecer as condições necessárias para a realização da etapa principal da presente dissertação.

Ao Francisco Torres, meu colega de curso e colaborador do CETECOFF, o meu profundo agradecimento pela amizade, companheirismo, apoio, debate de ideias, interesse e incentivo.

Ao Eng.º Tiago Barrigana e ao Eng.º Bruno Alves da ZCP pelo apoio e disponibilidade prestada.

Ao Eng.º Ramiro Martins, do CETRIB, pela ajuda e disponibilidade prestada durante as medições de rugosidade.

À minha família, principalmente aos meus pais Manuela Pinto e João Pinto e avós Beatriz Miranda e Domingos Coelho, pelo apoio incondicional, interesse, carinho e sobretudo por todos os sacrifícios suportados para que me tornasse alguém de quem eles se orgulhem. Sem vocês não teria chegado aqui, nem nada disto seria possível. O que sou devo-o a vocês.

À minha namorada, Gisela Ramos, pelo interesse demonstrado, apoio e incentivo principalmente nos momentos mais difíceis. O seu otimismo e confiança em mim foram bastante importantes na realização deste trabalho.

A todos o meu muito obrigado.



# Índice

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivos da dissertação . . . . .	1
1.2	Apresentação da empresa INEGI e ZCP . . . . .	1
1.3	Enquadramento da dissertação na empresa INEGI e ZCP . . . . .	2
1.4	Organização e temas abordados na presente dissertação . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>5</b>
2.1	Ligas de Titânio . . . . .	5
2.1.1	Titânio . . . . .	5
2.1.2	Aplicações das ligas Ti . . . . .	5
2.1.3	Aluminetos de Titânio . . . . .	7
2.1.4	Aplicações dos Aluminetos de Titânio . . . . .	8
2.1.5	Diagrama de equilíbrio das ligas TiAl . . . . .	9
2.1.6	Elementos de liga . . . . .	10
2.1.7	Comparação entre as ligas TiAl e outros materiais . . . . .	10
2.1.8	Síntese das propriedades das ligas TiAl . . . . .	14
2.2	Fundição por cera perdida . . . . .	15
2.2.1	Contextualização histórica . . . . .	15
2.2.2	Descrição geral do processo . . . . .	16
2.2.3	Vantagens e desvantagens do processo . . . . .	17
2.2.4	Aplicações do processo de fundição de precisão . . . . .	18
2.2.5	Fabrico dos modelos perdidos . . . . .	19
2.2.5.1	Principais ceras utilizadas e suas características . . . . .	19
2.2.5.2	Fabrico aditivo dos modelos perdidos . . . . .	20
2.2.5.3	Estereolitografia . . . . .	21
2.2.6	Construção das carapaças cerâmicas . . . . .	24
2.2.7	Compostos cerâmicos . . . . .	26
2.2.7.1	Refratariedade . . . . .	27
2.2.7.2	Estabilidade química . . . . .	27
2.2.7.3	Estabilidade térmica . . . . .	27

2.2.8	Barbotinas . . . . .	28
2.2.8.1	Ligantes e aditivos . . . . .	29
2.2.9	Formulações cerâmicas para ligas Ti e TiAl . . . . .	30
2.2.9.1	Formulações para camada de <i>facecoat</i> . . . . .	30
2.2.10	Formulações para camadas de <i>backup</i> . . . . .	31
2.2.11	Defeitos inerentes ao processo . . . . .	31
2.3	Fusão e vazamento . . . . .	34
2.3.1	Fusão . . . . .	34
2.3.1.1	Fusão por arco elétrico com eletrodo consumível . . . . .	34
2.3.1.2	Fusão por arco elétrico com eletrodo permanente . . . . .	35
2.3.1.3	Fusão por arco de plasma (PAM) . . . . .	36
2.3.1.4	Fusão por indução em cadinho de cobre refrigerado a água (VISM) . . . . .	36
2.3.1.5	Fusão por indução em cadinho cerâmico (VIM) . . . . .	38
2.3.2	Vazamento . . . . .	39
2.3.2.1	Vazamento por gravidade . . . . .	39
2.3.2.2	Vazamento por centrifugação . . . . .	39
2.3.2.3	Vazamento por baixa pressão - CLA, CLV e CLI . . . . .	41
2.4	Reatividade das ligas Ti e TiAl . . . . .	42
2.4.1	Formação da camada $\alpha$ -case . . . . .	42
2.4.1.1	Energia livre de formação ou de Gibbs . . . . .	43
2.4.1.2	Influência do teor de alumínio na formação da camada $\alpha$ -case . . . . .	47
2.4.1.3	Formação da camada $\alpha$ -case térmico . . . . .	48
2.5	Maquinagem química . . . . .	49
2.5.1	Remoção da camada alpha-case por maquinagem química . . . . .	51
2.5.1.1	Soluções ácidas utilizadas no processo de maquinagem química . . . . .	52
2.5.1.2	Taxa de remoção de material . . . . .	54
2.5.1.3	Eficiência do banho e reciclagem dos ácidos . . . . .	55
2.5.2	Maquinagem química de ligas de titânio . . . . .	58
2.5.3	Maquinagem química de ligas TiAl . . . . .	61
2.5.4	Maquinagem química de ligas de alumínio . . . . .	64
2.5.5	Defeitos associados ao processo de maquinagem química . . . . .	66
2.5.6	Ensaio para apuração dos resultados após maquinagem química . . . . .	69
2.5.6.1	Medições de rugosidade . . . . .	69
2.5.6.2	Medição de microdurezas . . . . .	70
2.5.6.3	Controlo dimensional . . . . .	71
2.5.6.4	Microscópio Eletrónico de varrimento . . . . .	72
2.5.7	Variantes do processo de maquinagem química . . . . .	72



2.5.7.1	Maquinagem eletroquímica . . . . .	73
2.5.7.2	Remoção de camada <i>alpha case</i> por laser . . . . .	75
2.5.7.3	Remoção de camada <i>alpha case</i> por jato de água . . . . .	76
<b>3</b>	<b>Procedimento Experimental, apresentação dos resultados e sua discussão</b>	<b>79</b>
3.1	Maquinagem química de ligas de titânio . . . . .	80
3.1.1	Especificações da tina existente na ZCP . . . . .	80
3.1.2	Desenvolvimento de tabuleiro para colocação de turbinas . . . . .	80
3.1.3	Procedimento adotado durante os ensaios . . . . .	81
3.1.4	Ensaio com turbinas <i>net shape</i> de TiAl . . . . .	84
3.1.4.1	Superfície apresentada pelas turbinas após maquinagem . . . . .	91
3.1.4.2	Microscopia eletrônica de varrimento das turbinas maquinadas . . . . .	94
3.1.4.3	Controlo dimensional . . . . .	100
3.1.4.4	Medições de rugosidades . . . . .	103
3.1.4.5	Análise de reatividade . . . . .	105
3.1.5	Ensaio com turbinas de 90 mm de diâmetro e <i>near-net shape</i> . . . . .	109
3.1.5.1	Controlo dimensional . . . . .	115
3.1.6	Ensaio com nova solução . . . . .	116
3.1.6.1	Medições de rugosidade . . . . .	118
3.1.7	Comparação entre as duas soluções utilizadas . . . . .	119
3.1.7.1	Comparação de aspeto das turbinas após maquinagem química com as diferentes soluções . . . . .	119
3.1.7.2	Comparação das taxas de remoção obtidas com as diferentes soluções . . . . .	120
3.1.7.3	Comparação das medições de rugosidade das turbinas expostas às duas soluções . . . . .	121
3.2	Projeto de moldes para pá de turbina . . . . .	122
3.2.1	Projeto de molde em estereolitografia . . . . .	123
3.2.1.1	Desenvolvimento do ficheiro CAD da pá de turbina . . . . .	123
3.2.1.2	Concepção do molde em estereolitografia . . . . .	125
3.2.1.3	Injeção de pás de turbina em cera . . . . .	128
3.2.1.4	Controlo dimensional das pás . . . . .	131
3.2.2	Projeto de molde em alumínio . . . . .	133
<b>4</b>	<b>Conclusões e trabalhos futuros</b>	<b>143</b>
4.1	Conclusões . . . . .	143
4.1.1	Maquinagem química de ligas de titânio . . . . .	143
4.1.2	Projeto de moldes para pás de turbina . . . . .	145
4.2	Trabalhos futuros . . . . .	145

**5 Anexos** **155**

5.1	Anexo A - Desenhos de conjunto dos constituintes do tabuleiro desenvolvido	155
5.2	Anexo B - Fichas de segurança dos ácidos utilizados . . . . .	158
5.2.1	Ácido Fluorídrico . . . . .	159
5.2.2	Ácido Nítrico . . . . .	166
5.2.3	Ácido Sulfúrico . . . . .	169
5.3	Anexo C - Espectros de constituintes das amostras sujeitas ao SEM e res- petivas imagens . . . . .	172
5.4	Anexo D - Ensaaios de rugosidades . . . . .	182
5.4.1	Perfis de rugosidade das turbinas maquinadas quimicamente com a solução 1 . . . . .	182
5.4.2	Perfis de rugosidade das turbinas maquinadas quimicamente com a solução 2 . . . . .	190
5.5	Anexo E - Ficha técnica do aço de construção CK45 . . . . .	192
5.6	Anexo F - Catálogo dos componentes <i>HASCO</i> . . . . .	193
5.6.1	Casquilho Z11/22/10 . . . . .	194
5.6.2	Pino Z01/10x60 . . . . .	195
5.7	Anexo G - Desenhos de conjunto dos moldes projetados . . . . .	195
5.7.1	Molde da pá de turbina em alumínio . . . . .	196
5.7.1.1	Meio molde inferior . . . . .	196
5.7.1.2	Meio molde superior . . . . .	197
5.7.1.3	Macho 1 . . . . .	198
5.7.1.4	Macho 2 . . . . .	199
5.7.1.5	Cunha 1 . . . . .	200
5.7.1.6	Cunha 2 . . . . .	201
5.7.1.7	Puzzle para as contrassaídas da pá . . . . .	202
5.7.2	Molde da pá de turbina em SL . . . . .	203

# Lista de Figuras

2.1	Hélices do motor <i>Trent</i> da <i>Rolls-Royce</i> [4] . . . . .	6
2.2	Aplicações médicas em ligas de titânio [1] . . . . .	6
2.3	Exemplo de componentes automóvel em titânio [1] . . . . .	7
2.4	Exemplo de uma turbina aplicada num turbocompressor [8] . . . . .	8
2.5	Motor <i>Genx-1B</i> e respetiva legenda dos vários componentes [11] . . . . .	8
2.6	Pá de turbina dos andares de baixa pressão de motor de avião [12] . . . . .	9
2.7	Diagrama de equilíbrio binário TiAl [6] . . . . .	9
2.8	Comparação do módulo de Young com a tensão limite de elasticidade para diferentes ligas à temperatura ambiente [17] . . . . .	11
2.9	Comparação do módulo de Young com a massa volúmica para diferentes materiais à temperatura ambiente [16] . . . . .	11
2.10	Comparação da tenacidade à fratura com a densidade para diferentes ligas à temperatura ambiente [17] . . . . .	12
2.11	Comparação do módulo de Young específico com a resistência mecânica específica para diferentes ligas à temperatura ambiente [16] . . . . .	12
2.12	Resistência mecânica específica versus Temperatura de serviço de diferentes ligas e materiais [18] . . . . .	13
2.13	Módulo de Young específico versus Temperatura de serviço de diferentes ligas [16] . . . . .	13
2.14	a) produção da moldação cerâmico, b) vazamento do metal, c) abate da carapaça, d) peça final. Adaptado de [21] . . . . .	15
2.15	Sequência de etapas do processo de fundição por cera perdida [22] . . . . .	17
2.16	Etapas para obter um modelo por fabrico aditivo [27] . . . . .	21
2.17	Esquema de equipamento de SL com os vários componentes [30] . . . . .	22
2.18	Exemplo de peça feita por " <i>Quick Cast</i> " que foi partida propositadamente para demonstrar a superfícies oca [31] . . . . .	23
2.19	Aspeto final de peça em estereolitografia [32] . . . . .	23
2.20	Imersão de cacho em barbotina [34] . . . . .	24
2.21	Pulverização de pós cerâmicos no cacho [34] . . . . .	25
2.22	Aspeto final da carapaça cerâmica [34] . . . . .	25
2.23	Esquema das várias camadas aplicadas aos cachos em cera [29] . . . . .	26
2.24	Tina rotativa que armazena a barbotina [38] . . . . .	28

2.25	Recipientes para as barbotinas em rolos de velocidade variável [37] . . . . .	29
2.26	(a) inclusão não metálica devido à presença de escória, (b) inclusão não-metálica cerâmica [42] . . . . .	32
2.27	Porosidade devido à existência de gás no metal [42] . . . . .	32
2.28	Exemplo de fissuração a quente [42] . . . . .	33
2.29	Rechupe na zona de ataque da peça após corte da mesma [42] . . . . .	33
2.30	(a) Exemplo de uma junta fria, (b) Exemplo de peça mal cheia [42] . . . . .	33
2.31	Esquema do aspeto de um forno de fusão por arco elétrico com eletrodo consumível [43] . . . . .	35
2.32	Esquema de um forno de fusão por tocha de plasma [6] . . . . .	36
2.33	Esquema do aspeto de um forno de indução [6] . . . . .	37
2.34	Níveis de contaminação do titânio fundido [45] . . . . .	37
2.35	Esquema do funcionamento do processo "Levicast" (a) Levitação total de uma gota de titânio líquido, (b) Levitação parcial num cadinho frio [45] . .	38
2.36	Exemplo de um cadinho cerâmico com <i>facecoat</i> de ítria [46] . . . . .	38
2.37	Esquema de vazamento por gravidade, sendo visível a turbulência gerada [48]	39
2.38	Ilustração dos principais processos de vazamento por centrifugação. a) LINN-Supercast e b) Leicomelt 5 TP. Adaptado de [46] . . . . .	40
2.39	Exemplificação do processo de vazamento CLV [6] . . . . .	41
2.40	Exemplificação do processo de vazamento Levicast [6] . . . . .	42
2.41	Exemplificação do processo de vazamento CLI [44] . . . . .	42
2.42	Diagrama de Ellingham [33] . . . . .	44
2.43	Estudo comparativo relativamente à concentração de oxigénio e dureza da camada $\alpha$ -case da liga Ti-46Al fundida em diferentes tipos de cadinhos cerâmicos [53] . . . . .	45
2.44	Microestrutura SEM da camada <i>alpha-case</i> no provete de titânio puro com revestimento de $SiO_2$ [54] . . . . .	46
2.45	Imagens da interface metal/carapaça para ligas com diferentes teores de Al: a)cp Ti, b) Ti-10Al, c)Ti-30Al, d)Ti-40Al, e) Ti-47Al e f) Ti-55Al [55] . . .	47
2.46	Perfil de durezas para as várias ligas com diferentes percentagens de alumínio [55] . . . . .	48
2.47	Microestrutura SEM da camada alfa case no provete de titânio puro com revestimento de $Al_2O_3$ [54] . . . . .	48
2.48	Dureza dos provetes em Ti-6Al-4V em função da profundidade da camada endurecida [51] . . . . .	49
2.49	Painel de avião com máscara aplicada nas zonas onde não é desejada a maquinagem química [57] . . . . .	50
2.50	Tipos de liga passíveis de serem maquinadas quimicamente e respetivos ácidos utilizados e rugosidades obtidas [59] . . . . .	51
2.51	Variação do pH do HF com a sua concentração [62] . . . . .	53
2.52	Total de massa removida por cada uma das soluções utilizadas no estudo [61]	54

2.53	Bolas flutuantes que reduzem taxa de evaporação [65] . . . . .	55
2.54	Processo de diálise por difusão para a reciclagem de ácidos [67] . . . . .	56
2.55	Equipamento de diálise por difusão para a reciclagem de ácidos [69] . . . . .	57
2.56	Esquema de funcionamento de equipamento de diálise por difusão para a reciclagem de ácidos [70] . . . . .	58
2.57	Taxa de remoção em função da percentagem de HF e HNO <sub>3</sub> [72] . . . . .	59
2.58	Absorção de hidrogénio em função da percentagem de HF e HNO <sub>3</sub> [72] . . . . .	59
2.59	Superfícies apresentadas após maquinagem química pelas soluções: (a) 1% Hf, (b) 2% HF, (c) 3% HF e (d) 4% HF [73] . . . . .	60
2.60	Taxa de remoção da solução 3% HF + 20% HNO <sub>3</sub> em função do tempo de ataque [73] . . . . .	61
2.61	Sistema utilizado para a realização dos testes de maquinagem química [33] .	62
2.62	Resultados obtidos para turbinas <i>near-net shape</i> , a) Taxas de remoção ob- tidas, b) Taxas de redução de espessura obtidas [33] . . . . .	63
2.63	Aspeto da parte inferior da turbina provocado pelo posicionamento da mesma e pela falta de agitação do banho [33] . . . . .	63
2.64	Medições de microdureza em turbina <i>near-net shape</i> com facecoat de zircão, a) Antes do ataque químico b) Após ataque químico durante 40 min [33] . .	64
2.65	Medições de microdureza em turbina <i>near-net shape</i> com facecoat de ítria, a) Antes do ataque químico b) Após ataque químico durante 40 min [33] . .	64
2.66	Profundidade de remoção em função da temperatura do banho [75] . . . . .	65
2.67	Profundidade de remoção em função da duração do ataque químico [75] . . .	65
2.68	Rugosidade da superfície em função da duração do ataque químico [75] . . .	66
2.69	Profundidade de remoção em função da temperatura do banho [75] . . . . .	66
2.70	Defeito por aparecimento de canal [59] . . . . .	67
2.71	Defeito por aparecimento de canal devido a bolhas de gás [59] . . . . .	67
2.72	Defeito por aparecimento de crateras na superfície da peça [59] . . . . .	67
2.73	Defeito por aparecimento de saliência nos <i>fillets</i> [59] . . . . .	68
2.74	Defeito por aparecimento de "ilhas" na superfície da peça [59] . . . . .	68
2.75	Defeito por formação de entalhe na superfície da peça, a) entalhe não aceite, b) entalhe aceitável [59] . . . . .	68
2.76	Exemplo de medição de rugosidade [77] . . . . .	69
2.77	Valores de rugosidade que as peças em <i>investment casting</i> têm de apresentar [78] . . . . .	70
2.78	Microdureza em função da distância à superfície da peça [79] . . . . .	70
2.79	Teste de dureza <i>Vickers</i> [80] . . . . .	71
2.80	Exemplo de sobreposição de turbina antes e após maquinagem química [42]	71
2.81	Esquema com o princípio de funcionamento do microscópio eletrónico de varrimento [81] . . . . .	72
2.82	Princípio de funcionamento do processo de maquinagem eletroquímica [82] .	73

2.83	Produção de pás de turbina através de maquinagem eletroquímica [82] . . .	74
2.84	(a) Esquema da secção transversal do provete após irradiação por laser, (b) Morfologia da superfície irradiada para profundidades de 4, 15, 30, 45, 60 e 72 $\mu\text{m}$ [84] . . . . .	76
2.85	Esquema da camada alpha case na amostra de Ti-6Al-4V e respetiva microscopia SEM [85] . . . . .	77
3.1	(a) Tina destinada aos testes de maquinagem química, (b) Interior da mesma	80
3.2	Elementos que constituem o tabuleiro desenvolvido, (a) tabuleiro, (b) parede principal, (c) parede secundária . . . . .	81
3.3	Tabuleiro desenvolvido no presente trabalho, (a) Aspeto do tabuleiro, (b) Turbina posicionada no compartimento . . . . .	81
3.4	Tina utilizada para os ensaios de maquinagem química . . . . .	82
3.5	Tina com a superfície coberta de bolas anti evaporação . . . . .	83
3.6	Procedimento adotado durante os ensaios de maquinagem química . . . . .	84
3.7	Turbina <i>net shape</i> de TiAl utilizada nos primeiros testes de maquinagem química . . . . .	84
3.8	Variação da temperatura do banho em função do tempo . . . . .	85
3.9	Bordo de alheta com remoção excessiva de material . . . . .	86
3.10	Resultados da taxa de remoção para diferentes durações de testes de maquinagem química . . . . .	87
3.11	Resultados da taxa de redução de espessura para diferentes durações de testes de maquinagem química . . . . .	89
3.12	Chapa de Ti-6Al-4V para facilitar controlo dimensional . . . . .	89
3.13	Amostras recolhidas durante os teste, a) Antes do início dos testes, b) Após 40 minutos, c) 50 minutos e d) 60 minutos . . . . .	90
3.14	Tiras utilizadas para a medição de pH, (a) Escala colorida indicadora do pH da solução, (b) Resultados de pH das quatro amostras recolhidas, 1. Amostra antes do primeiro teste, 2. Amostra após o ensaio de 40 minutos, 3. Amostra após o ensaio de 50 minutos, 4. Amostra após o ensaio de 60 minutos . . . . .	91
3.15	Medidor de pH e amostras recolhidas, a) Antes do início dos testes e d) após 60 minutos de imersão . . . . .	91
3.16	Camada presente na superfície das turbinas, a) 40 minutos, b) 50 minutos e c) 60 minutos . . . . .	92
3.17	Turbina de teste . . . . .	92
3.18	Turbinas testadas, (a) sem ácido fluorídrico, (b) com solução apresentada na Tabela 3.1 . . . . .	93
3.19	Turbina exposta à solução contendo ácido fluorídrico . . . . .	93
3.20	Sistema utilizado para a realização do teste sem <i>Erkantol</i> . . . . .	94
3.21	Turbina <i>near-net shape</i> com cerca de 42 mm de diâmetro após a realização do teste sem <i>Erkantol</i> . . . . .	94

3.22	Microscopia eletrónica de varrimento, (a) microscópio, (b) amostras . . . . .	95
3.23	Porta amostras com as amostras das turbinas e do disco de corte, a) parte superior com os fragmentos das alhetas de cada turbina, b) parte inferior com fragmentos da base das turbinas . . . . .	95
3.24	Espectro global de constituintes da amostra $A_A$ . . . . .	96
3.25	Zonas Z1 e Z2 da amostra $A_A$ . . . . .	96
3.26	Espectro de constituintes da zona Z1 da amostra $A_A$ . . . . .	97
3.27	Espectro de constituintes da zona Z2 da amostra $A_A$ . . . . .	97
3.28	Espectro global de constituintes da amostra $B_A$ . . . . .	98
3.29	Espectro global de constituintes da amostra $B_B$ . . . . .	99
3.30	Espectro global de constituintes da fita de carbono com pó da camada depositada nas turbinas . . . . .	99
3.31	Equipamento de levantamento de forma e turbina a ser digitalizada para o computador . . . . .	100
3.32	Turbina <i>net shape</i> com cerca de 42 mm de diâmetro com alvos colados na sua superfície . . . . .	100
3.33	Sobreposição das geometrias das peças não maquinada e maquinada quimicamente durante 40 minutos . . . . .	101
3.34	Sobreposição das geometrias das peças não maquinada e maquinada quimicamente durante 50 minutos . . . . .	102
3.35	Sobreposição das geometrias das peças não maquinada e maquinada quimicamente durante 60 minutos . . . . .	102
3.36	Controlo dimensional de turbina <i>near-net shape</i> maquinada quimicamente durante 40 minutos [42] . . . . .	103
3.37	Controlo dimensional da chapa de Ti-6Al-4V . . . . .	103
3.38	Medidor de perfis <i>Hommelwerke</i> e medição do perfil em alheta . . . . .	104
3.39	Aumento da rugosidade média em função da duração do processo de maquinação química . . . . .	105
3.40	Corte radial das turbinas para análise de reatividade . . . . .	105
3.41	Amostras montadas em resina . . . . .	106
3.42	Perfil de microdurezas no corpo da turbina virgem . . . . .	106
3.43	Perfil de microdurezas no corpo da turbina maquinada quimicamente durante 40 minutos . . . . .	107
3.44	Perfil de microdurezas na alheta da turbina virgem . . . . .	107
3.45	Perfil de microdurezas na alheta da turbina maquinada quimicamente durante 40 minutos . . . . .	108
3.46	Microestrutura de uma alheta de turbina <i>net shape</i> . . . . .	108
3.47	Microestruturas das turbinas maquinadas durante a) 40, b) 40, c)50, d) 50, e) 60 e f) 60 minutos . . . . .	109
3.48	Turbinas utilizadas neste ensaio , (a) turbina de maior diâmetro (90 mm), (b) turbina <i>near-net shape</i> . . . . .	110

3.49	Inclusões cerâmicas, (a) alheta, (b) base . . . . .	110
3.50	Turbina <i>near-net shape</i> com cerca de 42 mm de diâmetro parcialmente oxidada, (a) zonas que ainda não sofreram oxidação, (b) zona totalmente oxidada . . . . .	111
3.51	Aspetto da turbina com 90 mm de diâmetro após MQ . . . . .	111
3.52	Comparação de aspeto das turbinas após granalhagem . . . . .	112
3.53	Porosidades nas alhetas, (a) no bordo da alheta, (b) no interior e bordo da alheta . . . . .	112
3.54	Bordo das alhetas após MQ, (a) bordo com remoção uniforme, (b) bordo com remoção heterogénea . . . . .	113
3.55	Taxa de remoção de cada turbina utilizada no ensaio . . . . .	114
3.56	Taxa de redução de espessura de cada turbina utilizada no ensaio . . . . .	115
3.57	Levantamento de forma da turbina G1 . . . . .	116
3.58	Levantamento de forma da turbina G2 . . . . .	116
3.59	Turbina <i>near-net shape</i> utilizada no presente ensaio . . . . .	117
3.60	Aspetto da turbina <i>near-net shape</i> após MQ de 40 minutos . . . . .	118
3.61	Aspetto de turbinas <i>near-net shape</i> maquinadas com as diferentes soluções, a) solução 1, b) solução 2 . . . . .	119
3.62	Taxas de redução de peso média apresentadas pela solução 1 e 2 . . . . .	120
3.63	Taxas de redução de espessura média apresentadas pela solução 1 e 2 . . . . .	121
3.64	Comparação do aumento de rugosidade das turbinas maquinadas com ambas as soluções . . . . .	122
3.65	Aspetto da pá turbina facultada para o presente trabalho . . . . .	123
3.66	Aspetto da pá turbina com base e topo simplificadas . . . . .	124
3.67	Ângulo de saída introduzido nas secções retas da pá de turbina . . . . .	124
3.68	(a) Meio molde inferior do molde, (b) Meio molde superior do molde . . . . .	125
3.69	Pinos de guiamento introduzidos no molde da pá de turbina . . . . .	125
3.70	Respiros de modo a garantir o total enchimento da pá de turbina . . . . .	126
3.71	Canal para a entrada de cera no molde . . . . .	126
3.72	"Cama"destinada ao fabrico de molde em resina . . . . .	127
3.73	Molde em estereolitografia . . . . .	127
3.74	Molde em estereolitografia após enchimento com resina de poliuretano carregada com alumínio . . . . .	128
3.75	Etapas do processo de injeção de pás de turbina . . . . .	129
3.76	(a) Cuba de injeção e (b) desmoldante <i>DOMAX Silicone</i> . . . . .	129
3.77	Efeito de escada patente na pá de turbina em cera . . . . .	130
3.78	Mau enchimento da pá na zona do bordo de fuga . . . . .	130
3.79	Pá de turbina injetada com cera da ZCP . . . . .	131
3.80	Equipamento de levantamento de forma ATOS do INEGI . . . . .	132



3.81 Sobreposição da geometria do ficheiro CAD e da pá injetada com cera da ZCP . . . . .	132
3.82 Sobreposição da geometria do ficheiro CAD e da pá injetada com cera do INEGI . . . . .	133
3.83 Plano de apartação da pá de turbina . . . . .	134
3.84 Dois meios moldes da pá, a) inferior, b) superior . . . . .	134
3.85 Cavidade na base da pá de turbina . . . . .	135
3.86 Macho desenvolvido para auxiliar extração da pá de turbina . . . . .	135
3.87 Calha em aço de construção para permitir a movimentação que auxilia a extração da pá em cera . . . . .	136
3.88 Posições do movimento, (a) posição posterior após abertura do molde, (b) posição anterior para a remoção da peça . . . . .	136
3.89 Cunha para fixação do macho, a) aspeto do cunha, b) molde fechado com cunha a fixar o macho . . . . .	137
3.90 Zona de espessura fina no topo na pá de turbina . . . . .	137
3.91 Macho desenvolvido para auxiliar a remoção do topo da pá de turbina . . . . .	138
3.92 Cunha para fixação do macho, a) aspeto do cunha, b) molde fechado com cunha a fixar o macho . . . . .	138
3.93 (a) Canal de injeção no molde, (b) peça após injeção . . . . .	139
3.94 Furos para introdução de ferros para a abertura do molde . . . . .	139
3.95 Contrassaída na base da pá de turbina, a) parte superior, b) parte inferior . . . . .	140
3.96 Solução construtiva adotada para remoção da peça do molde, a) vista traseira, b) vista frontal . . . . .	140
3.97 (a) Pino <i>Hasco</i> Z01/10x60, (b) Casquilho <i>Hasco</i> Z11/22/10 . . . . .	140
5.1 Imagem SEM da turbina $A_A$ maquinada durante 40 minutos onde se verifica a camada de $TiO_2$ . . . . .	172
5.2 Imagem SEM da turbina $A_B$ maquinada durante 40 minutos onde se verifica a camada de $TiO_2$ . . . . .	173
5.3 Espectro da base da turbina $A_B$ maquinada durante 40 minutos onde se verifica a camada de $TiO_2$ . . . . .	173
5.4 Imagem SEM da turbina $A_B$ maquinada durante 40 minutos com a localização das zonas Z1 e Z2 . . . . .	174
5.5 Espectro da base da turbina $A_B$ maquinada durante 40 minutos na zona Z1	174
5.6 Espectro da base da turbina $A_B$ maquinada durante 40 minutos na zona Z2	175
5.7 Imagem SEM da turbina $B_A$ maquinada durante 50 minutos com a localização das zonas Z1 e Z2 . . . . .	175
5.8 Espectro da alheta da turbina $B_A$ maquinada durante 50 minutos na zona Z1	176
5.9 Espectro da alheta da turbina $B_A$ maquinada durante 50 minutos na zona Z2	176
5.10 Imagem SEM da turbina $B_B$ maquinada durante 50 minutos com a localização das zonas Z1 e Z2 . . . . .	177

5.11	Espectro da base da turbina $B_B$ maquinada durante 50 minutos na zona Z1	177
5.12	Espectro da base da turbina $B_B$ maquinada durante 50 minutos na zona Z2	178
5.13	Imagem SEM da turbina $C_A$ maquinada durante 60 minutos . . . . .	178
5.14	Espectro global da alheta da turbina $C_A$ maquinada durante 60 minutos . .	179
5.15	Imagem SEM da turbina $C_A$ maquinada durante 60 minutos com a loca- lização das zonas Z1 e Z2 . . . . .	179
5.16	Espectro da alheta da turbina $C_A$ maquinada durante 60 minutos na zona Z1	180
5.17	Espectro da alheta da turbina $C_A$ maquinada durante 60 minutos na zona Z2	180
5.18	Espectro global da base da turbina $C_B$ maquinada durante 60 minutos . . .	181
5.19	Espectro da base da turbina $C_B$ maquinada durante 60 minutos na zona Z1	181
5.20	Espectro da base da turbina $C_B$ maquinada durante 60 minutos na zona Z2	182
5.21	Perfil de rugosidade da alheta da turbina B1 antes do processo de MQ . . .	182
5.22	Perfil de rugosidade da alheta da turbina B1 após 40 minutos de MQ . . .	183
5.23	Perfil de rugosidade da alheta da turbina C1 antes do processo de MQ . . .	183
5.24	Perfil de rugosidade da alheta da turbina C1 após 40 minutos de MQ . . .	184
5.25	Perfil de rugosidade da alheta da turbina B2 antes do processo de MQ . . .	184
5.26	Perfil de rugosidade da alheta da turbina B2 após 50 minutos de MQ . . .	185
5.27	Perfil de rugosidade da alheta da turbina C2 antes do processo de MQ . . .	185
5.28	Perfil de rugosidade da alheta da turbina C2 após 50 minutos de MQ . . .	186
5.29	Perfil de rugosidade da alheta da turbina A3 antes do processo de MQ . . .	186
5.30	Perfil de rugosidade da alheta da turbina A3 após 60 minutos de MQ . . .	187
5.31	Perfil de rugosidade da alheta da turbina B3 antes do processo de MQ . . .	187
5.32	Perfil de rugosidade da alheta da turbina B3 após 60 minutos de MQ . . .	188
5.33	Perfil de rugosidade da alheta da turbina C3 antes do processo de MQ . . .	188
5.34	Perfil de rugosidade da alheta da turbina C3 após 60 minutos de MQ . . .	189
5.35	Perfil de rugosidade da alheta da turbina A4 antes do processo de MQ . . .	189
5.36	Perfil de rugosidade da alheta da turbina A4 após 60 minutos de MQ . . .	190
5.37	Perfil de rugosidade da alheta da turbina 1 antes do processo de MQ . . .	190
5.38	Perfil de rugosidade da alheta da turbina 1 após 40 minutos de MQ . . .	191
5.39	Perfil de rugosidade da alheta da turbina 2 antes do processo de MQ . . .	191
5.40	Perfil de rugosidade da alheta da turbina 2 após 40 minutos de MQ . . .	192

# Lista de Tabelas

2.1	Vantagens e desvantagens das fases $\alpha_2$ e $\gamma$ das ligas TiAl [14]	10
2.2	Elementos de liga utilizados nas ligas TiAl e respectiva influência [6; 14; 15]	10
2.3	Principais fabricantes de ligas TiAl e respectivas vantagens [14]	14
2.4	Tabela de comparação entre as ligas Ti, Ti64, TiAl e Superligas de Níquel [5; 14; 19]	14
2.5	Tipos industriais que recorrem à fundição de precisão [23]	19
2.6	Exemplos de processos de fabrico aditivo utilizados em investment casting [28; 29]	21
2.7	Valores de temperaturas de fusão e amolecimento dos cerâmicos referidos [33]	27
2.8	Propriedades térmicas dos refratários [33]	28
2.9	Composição das formulações para <i>facecoat</i> [33]	31
2.10	Constituintes da barbotina AFAL [33]	31
2.11	Processos de fusão de ligas Ti e TiAl [37]	34
2.12	Constituintes da camada <i>alpha-case</i> no titânio revestido por $SiO_2$ [54]	46
2.13	Matriz de decisão entre tipo de solvente a utilizar [58]	50
2.14	Custo de 23.000 litros de cada solução [61]	55
2.15	Constituintes do banho utilizado por Chen para testes de maquinagem química em ligas TiAl [74]	61
2.16	Constituintes da solução utilizada por Torres e Pires para testes de maquinagem química em turbinas de TiAl [33; 42]	62
2.17	Taxas de remoção teóricas de cada metal e respetivo eletrólito utilizado [59]	75
3.1	Constituintes da solução utilizada no primeiro teste de maquinagem química	82
3.2	Resultados de redução de peso das turbinas testadas	86
3.3	Resultados de redução de espessura nas turbinas submetidas a maquinagem química	88
3.4	Resultados das medições e pesagens da chapa antes e após maquinagem química	90
3.5	Resultados das medições de rugosidade antes e após maquinagem química	104
3.6	Resultados de redução de peso das turbinas de maior diâmetro (90 mm) e <i>near-net shape</i>	113
3.7	Resultados de redução de espessura nas turbinas G1 e G2 e <i>near-net shape</i>	115

3.8	Constituintes do banho utilizado por Chen para testes de maquinagem química em ligas TiAl [74] . . . . .	117
3.9	Resultados de redução de peso das turbinas <i>near-net shape</i> . . . . .	118
3.10	Resultados de redução de espessura das turbinas <i>near-net shape</i> . . . . .	118
3.11	Resultados das medições de rugosidade antes e após maquinagem química .	119
3.12	Comparação dos valores de rugosidade apresentados pelas turbinas submetidas a ambas as soluções . . . . .	121

# Lista de acrónimos, abreviaturas e siglas

AFAL - Barbotina de farinha de alumina fundida e ligante de alumina fumada

$Al_2O_3$  - Alumina (óxido de alumínio)

at% - Percentagem atómica

AWJ - *Abrasive Waterjet*

B - Boro

C - Carbono

CAD - *Computerized Assisted Design*

CaO - Cálcia (óxido de cálcio)

CETECOF - Unidade de Fundição e Novas Tecnologias

CLA - *Countergravity Low pressure Air*

CLI - *Countergravity Low pressure Inert gas*

CLV - *Countergravity Low pressure Vacuum*

Cr - Crómio

$CuSO_4$  - Sulfato de Cobre

DeMEC - Departamento de Engenharia Mecânica

FDM - Modelação de extrusão de plástico

$FeCl_3$  - Cloreto de Ferro

H - Hidrogénio

$HF_4$  - Ácido Fluobórico

HF - Ácido Fluorídrico

HIP - *Hot Isostatic Pressing*

$HNO_3$  - Ácido Nítrico

HWJC - *Hybrid Waterjet Cleaning*

$H_2SO_4$  - Ácido Sulfúrico

INEGI - Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

JANAF - *Joint Army Navy Air Force*

KCL - Cloreto de Potássio

LOM - Fabricação de objetos por camadas

M - Mol

MEQ - Maquinagem Eletroquímica  
MEV - Microscópio Eletrônico de Varrimento  
Mn - Manganês  
Mo - Molibdênio  
MQ - Maquinagem Química  
NaCl - Cloreto de Sódio  
NaF - Fluoreto de Sódio  
 $NaNO_3$  - Nitrato de Sódio  
NaOH - Hidróxido de Sódio  
Nb - Nióbio  
 $(NH_4)_2S_2O_8$  - Persulfato de Amônio  
PAM - *Plasma Arc Melting*  
PWJ - Plain Waterjet  
rpm - Rotações por minuto  
SEM - *Scanning Electronic Microscope*  
Si - Silício  
Sn - Estanho  
SL - Estereolitografia  
SLS - Sinterização Seletiva por Laser  
T - Temperatura  
Ta - Tântalo  
Tamb - Temperatura Ambiente  
Ti - Titânio  
TiAl - Aluminetos de Titânio  
TiCp - Titânio Puro  
 $TiO_2$  - Titânia (dióxido de titânio)  
UV - Ultra Violeta  
V - Vanádio  
VAR - *Vacuum Arc Melting*  
VIM - *Vacuum Induction Melting*  
VISM - *Vacuum Inductin Skull Melting*  
W - Tungstênio  
 $Y_2O_3$  - Ítria  
ZCP - Zollern & Comandita Portugal

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Objetivos da dissertação

Esta dissertação foi realizada para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Mecânica pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, e tem como objetivo principal desenvolver e implementar o processo de maquinagem química de ligas de titânio para turbinas e próteses.

O estudo e desenvolvimento do projeto foram realizados nas empresas de acolhimento INEGI e *Zollern & Comandita*, fábrica sediada no concelho da Maia.

Os objetivos gerais da dissertação, dividem-se em dois pontos principais, o primeiro referente ao desenvolvimento e implementação do processo de maquinagem química de ligas de titânio, nomeadamente criar as condições necessárias para a realização de testes de maquinagem química na ZCP, enquanto que o segundo ponto se prendeu com o projeto de dois moldes de uma pá de turbina para injeção de ceras, um em estereolitografia e outro em alumínio.

### 1.2 Apresentação da empresa INEGI e ZCP

A empresa de acolhimento, onde foi realizada esta dissertação de mestrado, designa-se por INEGI. O INEGI – Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, é uma instituição sem fins lucrativos, que promove a interface entre a Indústria e a Universidade, auxiliando a transferência de tecnologia e de inovação de base tecnológica, orientada para o desenvolvimento económico.

O INEGI nasceu no seio do Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (DEMEGI, agora DEMec) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) em 1986. Nos últimos 25 anos, tem desenvolvido e consolidado uma posição de parceiro da indústria em projetos de ID&I, representando estes projetos, a par da consultoria, cerca de 60% da sua atividade.

Com o estatuto de “Utilidade Pública” e com a figura jurídica de “Associação Privada sem Fins Lucrativos”, o INEGI intitula-se como um agente responsável no desenvolvimento do tecido empresarial nacional, auxiliando o desenvolvimento e consolidação de um modelo competitivo baseado na inovação de base tecnológica, no conhecimento e na densidade tecnológica dos produtos e dos processos.

A sua missão é a de contribuir para o aumento da competitividade da indústria, com recurso à investigação e desenvolvimento, transferência de tecnologia, demonstração e formação nas áreas de concepção e projeto, materiais, ambiente, gestão industrial, produção, energia e manutenção.

A empresa *Zollern & Comandita* faz parte do grupo Alemão *Zollern GmbH*, pioneiro na indústria do metal com mais de 300 anos de tradição e representado com 15 instalações na Europa, América e Ásia. Em Portugal, a ZCP iniciou o seu funcionamento em 1991, sendo o negócio dedicado exclusivamente à fundição por cera perdida de peças em aço e superligas para o setor automóvel, aeronáutico, aviação e outros. A empresa possui unidades desde a inicialização do projeto, departamento de injeção, departamento cerâmico, vazamento de metais ao ar, unidade de vácuo para fusão de superligas, departamento químico e unidade de acabamentos das peças. Com uma aposta na qualidade e desempenho, a ZCP apoia projetos de desenvolvimento e envolve-se numa filosofia *Kaizen*, ou seja, de melhoramento contínuo no seu meio interno.

### 1.3 Enquadramento da dissertação na empresa INEGI e ZCP

Durante os últimos anos, o INEGI juntamente com a *Zollern & Comandita* têm trabalhado lado a lado de forma a melhorar o processo de fundição por cera perdida para a obtenção de peças em ligas de titânio, nomeadamente turbinas e próteses.

A utilização de formulações mais reativas, que originam uma camada endurecida designada por *alpha case*, leva à procura de soluções para remover tal camada, assim como para reduzir a espessura de turbinas com alhetas mais espessas. Deste modo, surgiu a necessidade de recorrer ao processo de maquinagem química para resolver tais problemas. Assim sendo, pretende-se criar as condições necessárias para a realização de tal processo em ambiente industrial.

Com o interesse do INEGI em enveredar na indústria aeronáutica, uma das indústrias mais poderosas e rentáveis, nomeadamente demonstrar capacidade para o fabrico de pás de turbina em TiAl para introdução nos andares de baixa pressão de motor de avião, surgiu a possibilidade de projetar duas moldações para a injeção de cera. Uma moldação em estereolitografia e outra em alumínio.

### 1.4 Organização e temas abordados na presente dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em três partes distintas: revisão bibliográfica, procedimento experimental, apresentação dos resultados e sua discussão e finalmente, conclusões e trabalhos futuros.

A revisão bibliográfica incidiu sobre os seguintes temas:

- Material utilizado e suas aplicações
- Fundição de precisão
- Fusão e vazamento



- Reatividade das ligas de titânio
- Maquinagem química de ligas de titânio
- Maquinagem química de alumínio
- Variantes do processo

Relativamente ao procedimento experimental, apresentação dos resultados e sua discussão, explicam-se os:

- Procedimentos adoptados e matérias primas envolvidas nos testes de maquinagem química, assim como os resultados obtidos e sua discussão
- Projeto de moldações de pá de turbina para injeção de cera

Por fim são apresentadas as conclusões retiradas após a realização da presente dissertação, assim como se propõem trabalhos para desenvolver nos tempos vindouros.



## Capítulo 2

# Revisão Bibliográfica

### 2.1 Ligas de Titânio

No presente capítulo é feita uma abordagem sobre as ligas de titânio utilizadas na indústria, focando-se principalmente os aluminetos de titânio ( $\gamma$ -TiAl). Pois a base da presente dissertação irá assentar sobre estes compostos intermetálicos.

#### 2.1.1 Titânio

O titânio é o 9º elemento mais abundante da crosta terrestre e o 4º elemento metálico menos raro depois do alumínio, ferro e do magnésio. Foi descoberto em 1791 por William Gregor em Cornwall, Inglaterra. Contudo, devido à dificuldade de isolamento do titânio, só após a Segunda Guerra Mundial surgiu o interesse nas propriedades deste novo material. O desenvolvimento da indústria do titânio pode ser dividida em duas fases. A primeira, ocorrida entre o início dos anos 50 até finais da década de 80, caracterizou-se pelo progresso tecnológico onde as principais potências mundiais apostaram na produção em massa de esponja de titânio. É neste período que se dá o aparecimento das primeiras ligas de titânio, devido à adição de alumínio de modo a obter maior resistência. A adição de Sn originou as ligas  $\alpha$  destinadas a aplicações que trabalham a altas temperaturas e as ligas  $\alpha+\beta$  com a adição de Mo para aplicações que necessitam de elevada resistência. O maior avanço deu-se com o surgimento da liga Ti-6Al-4V, que se veio a tornar na liga  $\alpha+\beta$  mais importante devido à combinação de excelentes propriedades mecânicas com a sua boa produtividade. Mais tarde surgiram as ligas  $\beta$  ideais para trabalhos a quente ou a frio.

A segunda fase, que inclui os dias que correm, assenta numa era onde a vertente económica tomou conta da indústria, ou seja, vivem-se tempos de crise onde a poupança impera. Por conseguinte materiais que sejam leves e simultaneamente resistentes como o titânio irão ser cada vez mais empregues nas diversas áreas [1; 2; 3].

#### 2.1.2 Aplicações das ligas Ti

O titânio e suas ligas são usadas na indústria aeroespacial, química, automóvel e em aplicações médicas devido às suas excelentes características. O facto de possuir uma elevada relação resistência/peso e resistência à fadiga levou a que as ligas deste material fossem utilizadas em componentes aeroespaciais como partes de motores de foguetões, tanques de combustível, botijas de gás, etc. São também utilizadas em aplicações estru-

turais como suportes de trens de aterragem, tubagens hidráulicas ou parafusos de fixação. Na Figura 2.1, é apresentado um exemplo onde o titânio é empregue para o fabrico de hélices do motor *Trent* da *Rolls-Royce*.



Fig. 2.1: Hélices do motor *Trent* da *Rolls-Royce* [4]

Na indústria química e de engenharia em geral, a excelente resistência mecânica das ligas de titânio é um fator fundamental para o uso nestas áreas. Para componentes que sejam pouco solicitados a nível estrutural, o titânio puro (TiCp) é o mais indicado, enquanto que para aplicações com grandes solicitações mecânicas as ligas mais apropriadas a utilizar são a Ti-6Al-4V e a Ti-13Nb-13Zr.

No caso das aplicações médicas, o uso de ligas de titânio é bastante atrativo devido à sua superior biocompatibilidade e excelente resistência à corrosão relativamente a outras ligas usadas para o fabrico destes componentes tais como os aços inoxidáveis e ligas cobalto-crómio. O tipo de aplicações onde o titânio é aplicado são próteses, válvulas para o coração e implantes dentários. Estas são feitas recorrendo ao TiCp e à liga Ti-6Al-4V. Na Figura 2.2, podem-se visualizar algumas dessas aplicações.



Fig. 2.2: Aplicações médicas em ligas de titânio [1]

No setor automóvel, a procura de materiais alternativos que levem a redução de peso e aumento de performance tornou-se num aspeto de elevada importância. Deste modo, a introdução das ligas de titânio nesta indústria fez todo o sentido devido às suas características. Na Figura 2.3, estão presentes alguns exemplos de aplicações em titânio fabricados por algumas marcas do sector [1; 2].

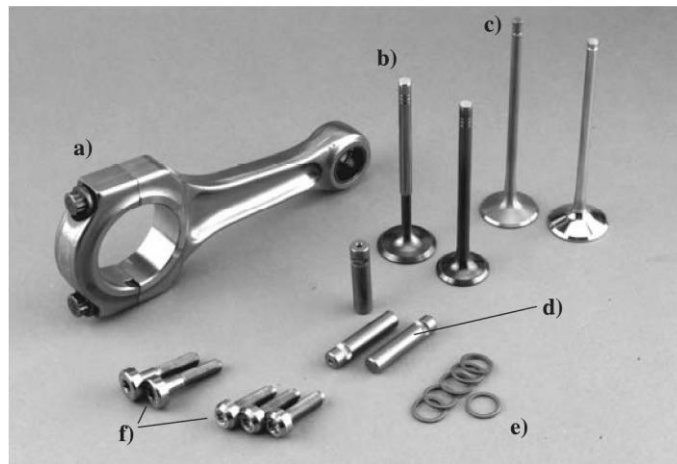


Fig. 2.3: Exemplo de componentes automóvel em titânio [1]

### 2.1.3 Aluminetos de Titânio

Os aluminetos de titânio, descobertos na década de 50, são ligas constituídas por dois metais (intermetálicos), que possuem uma estrutura cristalina distinta dos elementos que as compõem. O desenvolvimento deste tipo de ligas nas últimas décadas deveu-se à necessidade de materiais mais leves e resistentes por parte da indústria.

Este composto intermetálico suscitou um grande interesse devido às suas propriedades excelentes, entre elas [5; 6]:

- Elevado ponto de fusão (1460 °C);
- Baixa densidade (entre 3,7 a 3,9  $g/cm^3$ ) comparativamente com as ligas de níquel;
- Elevada resistência mecânica específica e rigidez;
- Boa estabilidade estrutural;
- Boa resistência à oxidação, devido à maior percentagem de alumínio presente do que nas ligas de titânio convencionais;
- Boa resistência à corrosão e fluência;

Contudo, estes apresentam desvantagens que têm limitado a sua utilização, tais como [5; 6]:

- Baixa ductilidade à temperatura ambiente comparativamente com as ligas convencionais (Ti-6Al-4V, etc.);
- Fragilidade e baixa tenacidade;
- Baixa resistência mecânica a baixas temperaturas;
- Baixa resistência à oxidação a temperaturas superiores a 800 °C;

### 2.1.4 Aplicações dos Aluminetos de Titânio

A necessidade de materiais leves e capazes de operar a altas temperaturas levaram à indústria automóvel e a de aviação a recorrer aos aluminetos de titânio. Nas aplicações as ligas TiAl competem directamente com as superligas de níquel. No sector automóvel, uma das principais aplicações são as turbinas presentes nos turbocompressores usados nos motores de combustão interna, como se pode observar na Figura 2.4. Estas têm sido alvo de um forte investimento com o intuito de aumentar o seu rendimento. Esse aumento promove a melhoria do poder de aceleração e a redução do consumo de combustível e de emissão de gases de escape. Normalmente feitas com ligas à base de Ni, a substituição por ligas TiAl leva a uma redução do peso para cerca de metade, uma vez que a densidade das superligas de níquel é de  $8\text{ g/cm}^3$  enquanto que a massa específica dos aluminetos de titânio varia entre os  $3,7$  e  $3,9\text{ g/cm}^3$  [7].

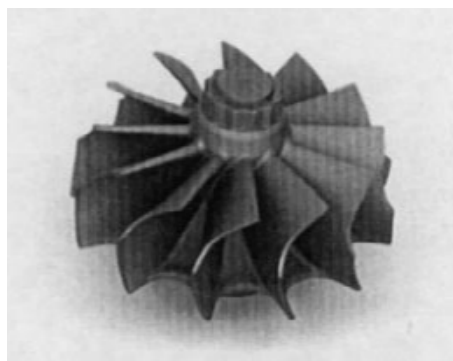


Fig. 2.4: Exemplo de uma turbina aplicada num turbocompressor [8]

Na indústria de aviação, um dos exemplos de aplicação reside nos motores de avião. Neste setor, a *General Electric* foi pioneira ao introduzir pela primeira vez o TiAl no motor *Genx-1B*, presente na Figura 2.5. O recurso a esta liga, presente nas pás de turbina dos andares de baixa pressão (Figura 2.6), pode reduzir o peso do motor cerca 180 kg, o que proporciona uma redução em 20% no consumo de combustível, de ruído em 50% e de emissão de NOx em 80% comparativamente com motores da sua classe [9; 10].

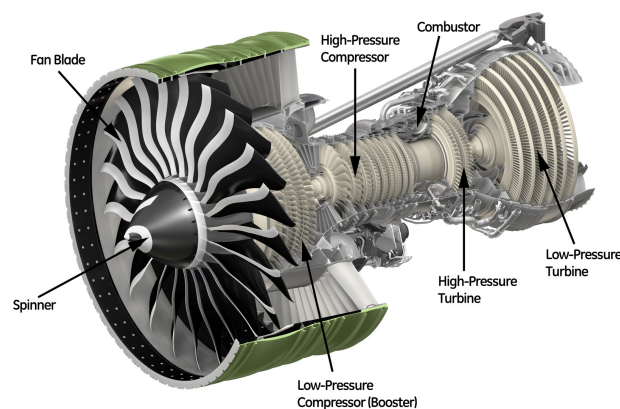


Fig. 2.5: Motor *Genx-1B* e respetiva legenda dos vários componentes [11]



Fig. 2.6: Pá de turbina dos andares de baixa pressão de motor de avião [12]

### 2.1.5 Diagrama de equilíbrio das ligas TiAl

Nas últimas duas décadas realizou-se um estudo intensivo com o intuito de estabelecer o diagrama de equilíbrio binário Ti-Al. Porém, ainda hoje se encontram discrepâncias nos modelos expostos por diversos autores. Estas devem-se, em parte, à grande sensibilidade a impurezas não metálicas, em particular o oxigénio [6].

Na Figura 2.7 encontra-se exposta uma das versões do diagrama de equilíbrio binário Ti-Al.

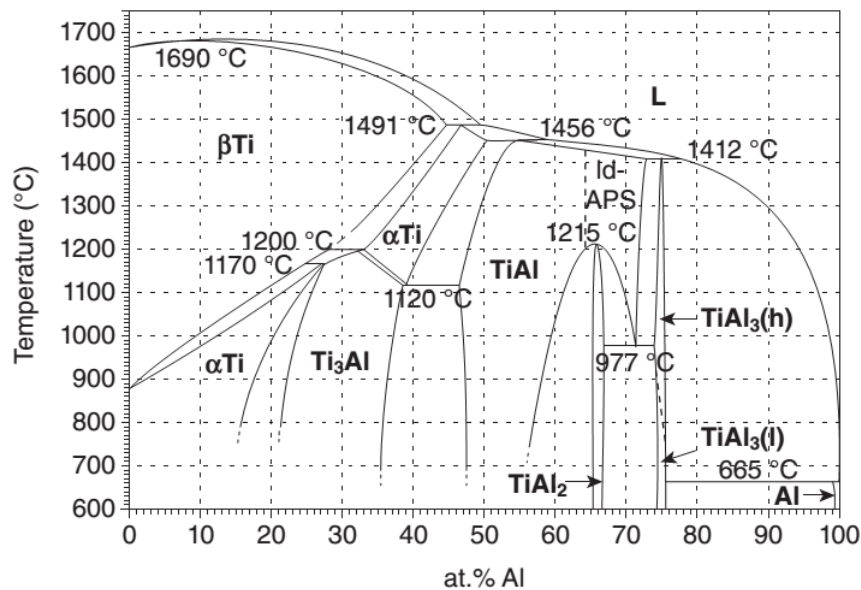


Fig. 2.7: Diagrama de equilíbrio binário TiAl [6]

Analisando o diagrama é possível observar as várias fases das ligas TiAl, sendo possível destacar [13]:

- fase líquida (L);
- fase  $\alpha$  (Ti);
- fase  $\beta$  (Ti);
- fase  $\alpha_2$  ( $Ti_3Al$ ) - 22% a 39% de Al;

- fase  $\gamma$  (TiAl) - 46% a 66% de Al.

Das fases acima citadas, as que se podem destacar são a  $\alpha_2$  e a  $\gamma$ . Na Tabela 2.1, é feita uma comparação entre as características das fases em questão.

Tabela 2.1: Vantagens e desvantagens das fases  $\alpha_2$  e a  $\gamma$  das ligas TiAl [14]

	Vantagens	Desvantagens
$\alpha_2$ (<40% Al)	Boa resistência mecânica a altas temperaturas	Muito baixa ductilidade
		Alta absorção de O e H provocando fragilidade a altas temperaturas
$\gamma$ (>50% Al)	Excelente resistência à oxidação	Ductilidade praticamente nula à temperatura ambiente mesmo com a adição de elementos de liga
	Absorção de hidrogénio muito baixa	

Contudo, estas fases não possuem grande interesse a nível de engenharia. Mas a junção das duas fases com percentagens de alumínio entre os 40 e 48% demonstra grande valia para diversas aplicações estruturais. Designadas apenas por  $\gamma$ -TiAl, caracterizam-se por serem muito sensíveis à microestrutura, tamanho de grão e elementos de liga [15].

## 2.1.6 Elementos de liga

A influência dos vários elementos de liga nas características mecânicas dos aluminetos de titânio tem sido alvo de um grande interesse e inerente investigação. Contudo, ainda não se obteve uma liga TiAl genérica para todas as aplicações. Deste modo, é necessário efetuar uma selecção dos elementos de liga em função das exigências de utilização do componente [6].

De acordo com a seguinte equação é possível observar quais os elementos que as ligas bifásicas podem conter [14]:

$$Ti_{42-52} - Al_{45-48} - X_{1-3} - Y_{2-5} - Z_{<1} \quad (2.1)$$

Na Tabela 2.2, estão presentes os elementos de liga correspondentes às siglas X, Y e Z assim como a influência dos mesmos.

Tabela 2.2: Elementos de liga utilizados nas ligas TiAl e respetiva influência [6; 14; 15]

	Elementos de liga	Influência
<b>X</b>	Cr, Mn, V	Aumento da ductilidade
<b>Y</b>	Nb, Ta, W, Mo	Melhora a resistência à oxidação, fluência e resistência a altas temperaturas
<b>Z</b>	B, C, Si	Aumento da dureza, resistência à fluência e oxidação

## 2.1.7 Comparação entre as ligas TiAl e outros materiais

Na classe das ligas intermetálicas, podem-se destacar três compostos, os aluminetos de níquel, os aluminetos de ferro e os aluminetos de titânio. Entre estas, somente as ligas  $\gamma$ -TiAl estão a progredir no sentido de serem incorporadas no desenvolvimento de



aplicações estruturais na próxima década, substituindo as ligas de titânio convencionais e as superligas de níquel. Estando, as restantes, destinadas a aplicações funcionais e não estruturais, onde oferecem vantagens de custo relativamente às superligas tradicionais [16; 17].

A comparação entre os aluminetos de titânio e as ligas convencionais permite entender o potencial que estes compostos intermetálicos possuem. Atente-se nas Figuras 2.8 e 2.9, onde é apresentado o módulo de Young em função da tensão limite de elasticidade e densidade, respetivamente.

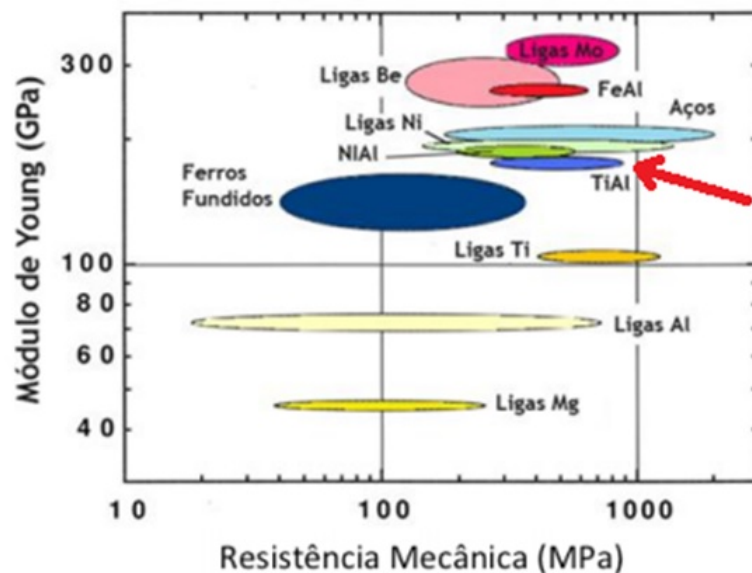


Fig. 2.8: Comparação do módulo de Young com a tensão limite de elasticidade para diferentes ligas à temperatura ambiente [17]

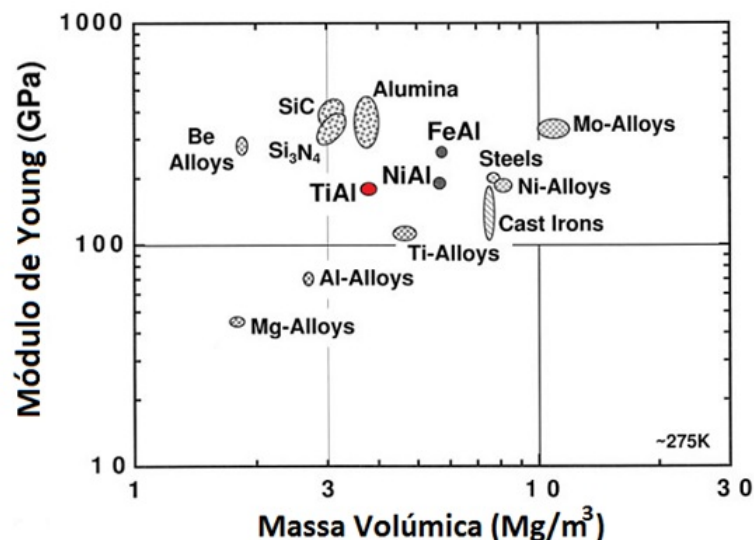


Fig. 2.9: Comparação do módulo de Young com a massa volúmica para diferentes materiais à temperatura ambiente [16]

Posto isto, é possível afirmar que as ligas TiAl possuem valores de resistência mecânica e de módulo de Young semelhantes aos aços e às ligas de níquel, com a vantagem de

possuírem uma densidade bastante inferior aos mesmos.

Na Figura 2.10, após comparação da tenacidade à fratura com a massa volúmica das vários ligas é possível observar que os compostos à base de TiAl possuem baixa tenacidade à fratura e baixa ductilidade à temperatura ambiente, dificultando o uso destas ligas para aplicações estruturais [17].

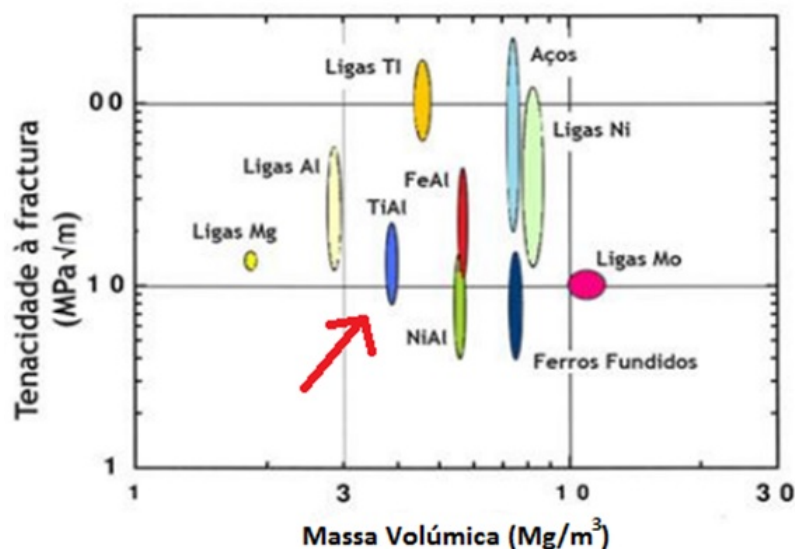


Fig. 2.10: Comparação da tenacidade à fratura com a densidade para diferentes ligas à temperatura ambiente [17]

Na Figura 2.11, as ligas TiAl apresentam um módulo de Young específico superior ao das ligas de titânio e de níquel, para valores semelhantes de resistência específica. Somente as ligas de berílio possuem um módulo de Young específico (módulo de Young/massa específica) superior às restantes ligas analisadas.

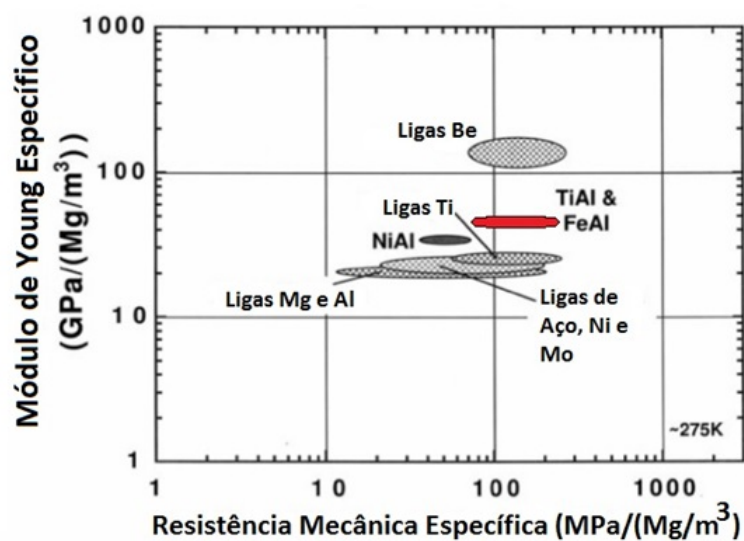


Fig. 2.11: Comparação do módulo de Young específico com a resistência mecânica específica para diferentes ligas à temperatura ambiente [16]

Outra razão para o uso dos aluminetos de titânio em detrimento das ligas convencionais-

mente utilizadas prende-se com a superior temperatura de serviço por estes apresentada e pela inferior degradação das suas propriedades com o o aumento da temperatura. A Figura 2.12 demonstra a superioridade de resistência mecânica específica dos aluminetos de titânio face às superligas de níquel e ligas de titânio a partir dos 500 K. Apenas os monocristais de níquel e os refractários apresentam um intervalo de temperaturas de serviço superiores, mas para valores inferiores de resistência mecânica específica [16].

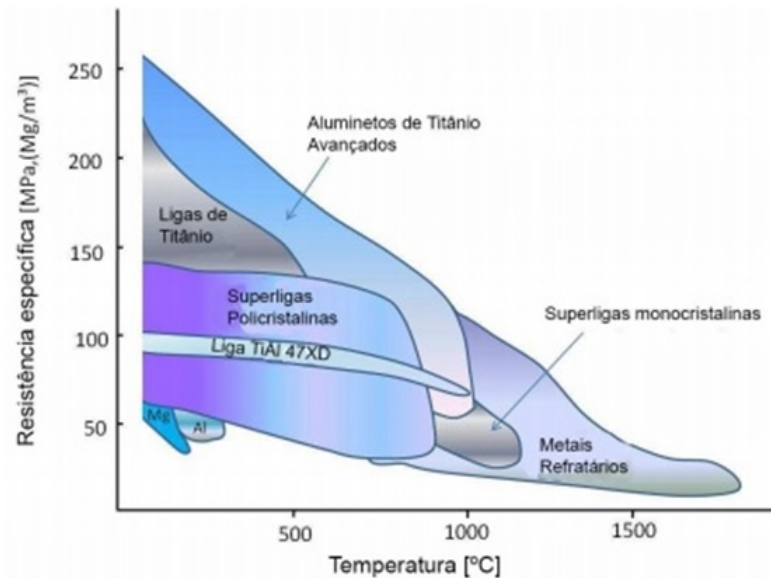


Fig. 2.12: Resistência mecânica específica versus Temperatura de serviço de diferentes ligas e materiais [18]

A Figura 2.13 revela que as ligas TiAl apresentam um módulo de Young específico 50 a 70% superior às ligas de Titânio convencionais e superligas, mantendo a sua rigidez a altas temperaturas [16].

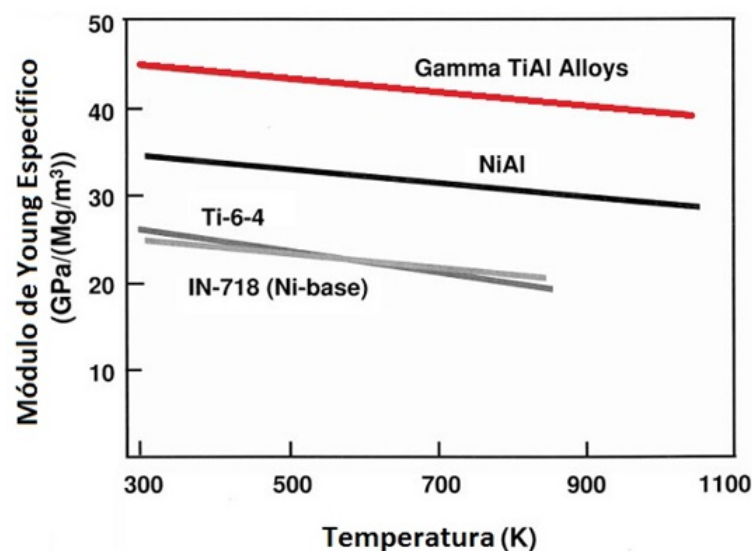


Fig. 2.13: Módulo de Young específico versus Temperatura de serviço de diferentes ligas [16]

### 2.1.8 Síntese das propriedades das ligas TiAl

A investigação efectuada nos últimos 20 anos proporcionou o desenvolvimento de várias ligas à base de TiAl. No entanto, é possível destacar quatro ligas existentes no mercado com excelentes propriedades mecânicas a altas temperaturas e os respectivos fabricantes, descritas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Principais fabricantes de ligas TiAl e respectivas vantagens [14]

Fabricante	Liga	Composição química	Vantagens
General Electric (EUA)	48-2-2	Ti-48Al-2Cr-2Nb	Ductilidade, resistência à fractura e oxidação
Plansee (Áustria)	$\gamma$ -MET	Ti-45Al-(5-10)Nb	Resistência mecânica a altas temperaturas e resistência à oxidação, fadiga e fluência
GKSS (Alemanha)	TNB	Ti-(45-47)Al-10Nb	Resistência mecânica a altas temperaturas e resistência à oxidação, fadiga e fluência
MartaMarietta Laboratories (EUA)	XDTM TiAl	Ti-45Al-2Mn-2Nb-0.8B	Resistência mecânica a altas temperaturas, ductilidade, rigidez e resistência à oxidação, e fluência

Na Tabela 2.4 é possível visualizar uma detalhada comparação de propriedades de várias ligas.

Tabela 2.4: Tabela de comparação entre as ligas Ti, Ti64, TiAl e Superligas de Níquel [5; 14; 19]

Propriedade	Ti	Ti-6Al-4V	$\gamma$ -TiAl	Superligas Ni
Densidade ( $g/cm^3$ )	4.5	4.51	3.7-3.9	8.3
Ponto de fusão ( $^{\circ}C$ )	1600	1610-1660	1460	1400
Coef. Poisson	0.361	0.339-0.349	0.27	0.29
Módulo Young (GPa)	96-110	113-115	160-176	206
Tensão limite elasticidade (MPa)	380-1150	786-898	400-650	800-1200
Tensão de Ruptura (MPa)	480-1200	869	450-800	1200
Ductilidade Tamb (%)	12-25	8-10	1-5	15
Ductilidade ( $> 600^{\circ}C$ ) (%)	12-50	-	10-60	8-125
Dureza (HV)	125-135	332-366	180-450	200-600
Temperatura Limite de Fluência ( $^{\circ}C$ )	538-600	-	1000	1090
Resistência à oxidação ( $^{\circ}C$ )	539-600	-	900-1000	1090
Coef. Exp. Térmica ( $\times 10^{-6} C^{-1}$ )	8.41	8.7-9.1	9	9-13.5
Condutividade térmica (W/mK)	11.4	8.73-8.91	22	11
Custo (€/Kg)	20	19.9-21.9	200	35

## 2.2 Fundição por cera perdida

Fundição de cera perdida (também conhecida como fundição de precisão ou em inglês "*Investment Casting*") é um processo existente há milhares de anos. Conhecido por permitir o fabrico de peças com geometria complexa, que não sejam possíveis de maquinar, ou em que a maquinagem encareça a peça. Através deste processo é possível obter peças com excelente precisão dimensional e excelentes acabamentos superficiais, possibilitando o vazamento de qualquer tipo de liga.

### 2.2.1 Contextualização histórica

Por detrás do processo de cera perdida está associada uma rica história com milhares de anos. Com data e locais de origem incertos, o processo foi utilizado pelo Homem primitivo para a produção de setas medievais, estátuas em bronze ou jóias em ouro. Contudo, o primeiro registo do processo escrito pelo monge Theophilius Presbyter é datado de 1100 D.C [20].

O desenvolvimento do processo levou a uma evolução nas peças fabricadas. As primeiras eram maciças e posteriormente foi possível o fabrico de peças ocas e com paredes muito finas. Este método foi bastante utilizado por várias civilizações da era antiga, tais como os egípcios, gregos, chineses e os astecas do México, em que o modelo era esculpido em cera, revestido por material refractário e de seguida aquecido para eliminar a cera de modo a criar a cavidade para realizar o posterior vazamento do metal líquido. Na Figura 2.14 é demonstrada a sequência do processo para a produção de setas medievais [20; 21].

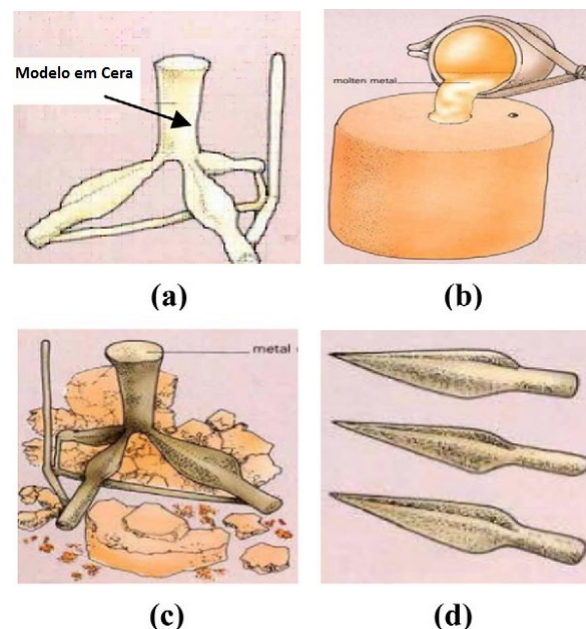


Fig. 2.14: a) produção da moldação cerâmica, b) vazamento do metal, c) abate da carapaça, d) peça final. Adaptado de [21]

Esta técnica ressurgiu no final do século 19, quando os dentistas se apoiaram neste processo para fazer coroas dentárias.

Com o surgimento da Segunda Guerra Mundial o processo de fundição por cera perdida acelerou devido à necessidade de produzir peças com elevada precisão dimensional e elevada

resistência mecânica em ligas difíceis de maquinar ou forjar. Com isto, o método provou ser eficiente, confiável e pouco dispendioso para satisfazer as exigências de uma guerra. No pós guerra, esta técnica expandiu-se para diversas áreas e aplicações [20].

### 2.2.2 Descrição geral do processo

O processo de cera perdida é caracterizado por ser um processo moroso, sendo constituído por várias etapas. Este pode ser realizado de duas formas, pelo método direto ou indireto. O primeiro consiste na utilização imediata do modelo sem recorrer a uma moldação. O modelo poderá ser feito em cera, madeira, ou outro material de baixo ponto de fusão e fácil remoção. Enquanto que o segundo é caracterizado pelas seguintes etapas até chegar ao produto final, sendo completado com recurso à Figura 2.15:

1. Fabrico do modelo para obtenção do molde principal. Este pode ser feito de diferentes materiais, tais como metal, madeira, silicone ou por recurso ao fabrico aditivo, consoante o número de séries. Aquando do fabrico do modelo deve ser assegurada a contração da cera e do metal a vaziar;
2. Obtenção do molde para injeção de cera com a geometria exata da peça, com a compensação necessária da contração da cera e do metal. O molde é geralmente em alumínio por ser leve (deve ser fácil de transportar pelos operadores), fácil de maquinar e bom condutor térmico. Para além disto, a máquina de injeção possui pratos refrigerados também em alumínio que têm como objetivo arrefecer a cera pós injeção. Para o caso de séries muito elevadas, recorre-se a aços de ferramenta para o fabrico do molde. Para a realização de protótipos ou pré séries é usual o molde ser fabricado em ligas de baixo ponto de fusão ou em silicone;
3. Injeção da cera no molde para criar o modelo. Este deve ser retirado depois de arrefecido;
4. Construção da "árvore" ou cacho, onde são colados vários modelos da mesma peça;
5. Cobertura da árvore através de um revestimento cerâmico adequado que deve suportar elevadas temperaturas e reproduzir todos os detalhes da peça. É feita uma imersão do cacho na barbotina e de seguida passagem por chuveiro de pós cerâmicos que aderem à superfície do cacho. Esta etapa é repetida até obter uma carapaça com a espessura requerida de modo a que esta aguarde a expansão da cera aquando da sua remoção e posteriormente as pressões metalostáticas durante o vazamento;
6. Realização de descerificação, processo em que a carapaça é aquecida até uma temperatura que funde a cera deixando um "negativo" no interior da carapaça;
7. Sinterização da carapaça para que esta apresente melhores propriedades mecânicas para o vazamento do metal, esta etapa tem também como propósito eliminar qualquer resíduo de cera existente na carapaça;
8. Pré-aquecimento da carapaça de modo a evitar a ocorrência de choque térmico aquando o vazamento do metal;
9. Vazamento do metal líquido para o interior da carapaça;

10. Abate da carapaça após solidificação, esta etapa conhecida como *Knock out* é realizada com recurso a um martelo vibratório. Caso as peças vazadas sejam de geometria complexa, a quebra da carapaça deve ser feita por granalhagem;
11. Corte dos gitos e sistema de alimentação;
12. Caso seja necessário deve-se proceder a operações de acabamento por maquinagem, podendo esta ser convencional ou química.

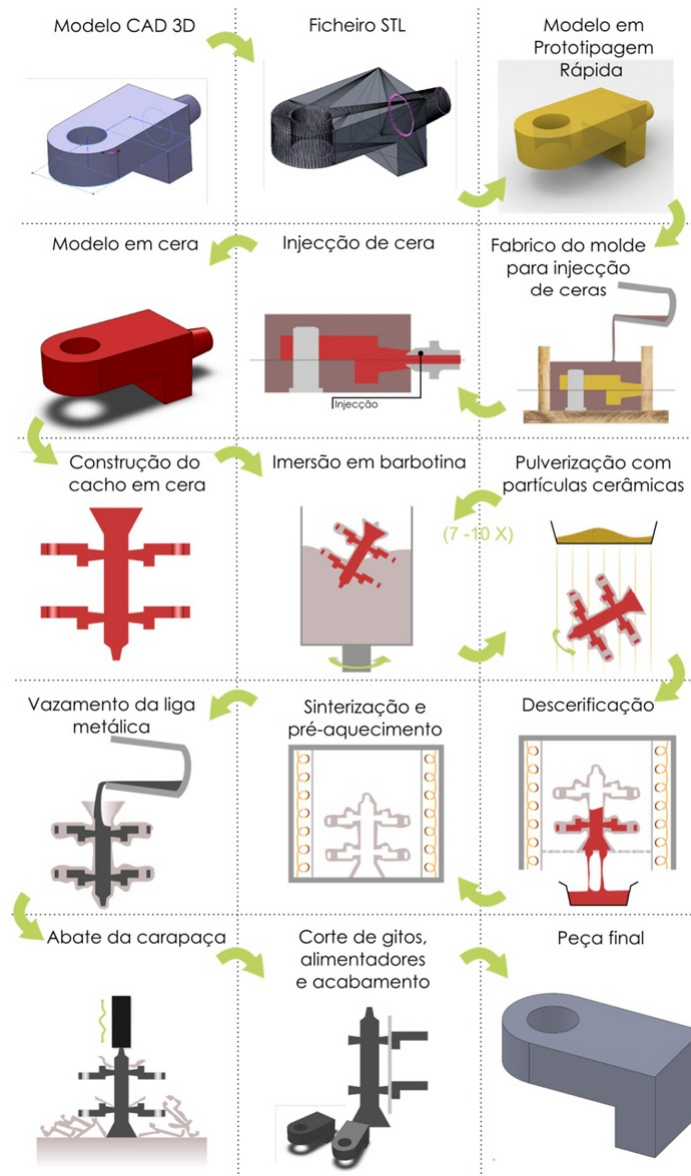


Fig. 2.15: Sequência de etapas do processo de fundição por cera perdida [22]

### 2.2.3 Vantagens e desvantagens do processo

O processo de "*Investment casting*" tem como principais vantagens [23]:

- Vasta gama de ligas possíveis de vaziar, incluindo ligas difíceis de maquinar ou impossíveis de forjar ;



- Capacidade de obter peças de elevada complexidade, sendo apenas limitada a produção do macho cerâmico. Deste modo, evita-se a produção de peças em partes separadas, visto que através deste processo a peça é feita integralmente a um custo inferior e com precisão dimensional mais elevada e melhor funcionalidade;
- Capacidade de obter peças *near net-shape* ou *net-shape*, devido à ausência de linhas de partição o que implica peças que não necessitem de operações de maquinagem ou cujas operações de acabamento sejam diminutas;
- Recurso ao fabrico aditivo com objetivo de projetar e analisar de forma rápida os modelos.
- Apresentar tolerâncias dimensionais apertadas e baixos valores de rugosidade. O fato de produzir componentes muito próximos do aspeto final, a fundição de precisão possui grandes vantagens em relação à fundição em areia e ao forjamento convencional. Para peças com dimensões até 13 mm, o "investment casting" apresenta tolerâncias dimensionais lineares de  $\pm 0,13$  mm, enquanto que a fundição em areia apresenta  $\pm 0,38$  mm [24].
- Peças finais possuem excelentes propriedades mecânicas;
- Possibilidade de reutilização de ceras para fabrico de cachos.

Apresenta como principais desvantagens [25]:

- Processo moroso, levando vários dias desde a criação do modelo até à obtenção da peça final;
- Carapaças apenas podem ser utilizadas uma vez, pois são destruídas pós solidificação do metal;
- Necessidade de mão de obra para a criação das carapaças encarece o processo;
- Processo limitado ao tamanho das peças.

#### 2.2.4 Aplicações do processo de fundição de precisão

O processo de fundição de precisão por permitir o fabrico de peças com elevada qualidade final e precisão dimensional, possui grande importância na área aeroespacial e automóvel. Assim sendo, estas recorrem a este tipo de fundição para a produção de pás de turbinas e turbinas para turbocompressores. No entanto, o processo aplica-se a outro tipo de indústrias, tais como as descritas na Tabela 2.5.



Tabela 2.5: Tipos indústrias que recorrem à fundição de precisão [23]

Armamento	Equipamento metalúrgico
Automóveis	Equipamento ótico
Bicicletas e motociclos	Equipamento petrolífero e auxiliar
Bombas	Equipamento têxtil
Câmaras	Ferramentas de maquinagem
Computadores e processamento de dados	Ferramentas dentárias e implantes dentários
Comunicações	Ferramentas manuais
Electrónica e radares	Joalharia
Equipamento para agricultura	Motores de aeronaves, elementos estruturais de aviões, pás de compressores, pás de turbinas, sistemas de combustível
Equipamento para construção	Próteses humanas
Equipamento para embalagem	Sistemas de suporte aeroespaciais, mísseis
Equipamento para manuseio de materiais	Sistemas hidráulicos e pneumáticos
Equipamento de resgate e suporte	Transportes, motores diesel, turbinas
Equipamento desportivo e de recreio	Turbinas estacionárias
Equipamento elétrico	Válvulas

### 2.2.5 Fabrico dos modelos perdidos

Os modelos utilizados para a fundição de precisão são normalmente feitos através de injeção de cera. O modo de injeção varia consoante a série de modelos a fabricar, podendo ser manual para uma pequena série ou automática para grandes séries. Numa fase inicial do processo, é usual após obter o CAD 3D do modelo, recorrer ao fabrico aditivo para fabricar o modelo, atente-se no capítulo 2.2.5.2, onde se descreve este tipo de processo.

No projeto do molde devem-se ter em consideração vários pressupostos como a contração da cera após arrefecimento e do metal após solidificação.

#### 2.2.5.1 Principais ceras utilizadas e suas características

Os modelos perdidos tal como o nome indica irão ser destruídos na altura de descerificação de modo a criar um "negativo" na carapaça, tal como foi explicado em 2.2.2. Por conseguinte, o material a ser usado para o fabrico dos modelos deve possuir um baixo ponto de fusão para que a sua destruição seja fácil. Assim sendo, os materiais que respeitam esta condição são a cera, plásticos (poliestireno) ou até mesmo mercúrio congelado, sendo o mais utilizado a cera [21].

Para que as ceras possam ser utilizadas no processo têm de apresentar uma série de características tais como [21]:

1. Possuir um coeficiente de expansão térmico o mais baixo possível de maneira a obter uma forma com uma excelente precisão dimensional;
2. Ponto de fusão não deve ser muito superior que a temperatura ambiente de modo a evitar distorções e cavitações superficiais;

3. Deve ser resistente à temperatura ambiente o suficiente para que se possa manusear o modelo sem haver dano;
4. Apresentar superfície lisa com o intuito de obter uma peça final com superfície semelhante e simultaneamente molhável para que quando o cacho com os modelos for imerso na barbotina esta aderir à cera;
5. A sua viscosidade deve ser baixa de modo a que a cera quando injetada preencha todas as cavidades do molde;
6. A sua extração após solidificação deve ser rápida e fácil;
7. No momento da descerificação a cera deve produzir o menor número de cinzas possível para que não restem resíduos no interior da carapaça.

Outros factores como custo, facilidade de reciclagem, toxicidade, etc. devem ser tidos em conta na selecção da cera para o fabrico dos modelos [21].

Para além do modelo, também os sistemas de gitagem são feitos em cera. No entanto, é conveniente que a cera do modelo apresente um ponto de fusão superior ao dos gitos. Deste modo, garante-se um maior espaço para a expansão térmica do modelo, evitando a fratura da carapaça.

As principais ceras utilizadas no processo são as de parafina e as microcristalinas, estas podem também ser utilizadas em conjunto, devido à complementaridade das suas propriedades [23].

As ceras de parafina, com pontos de fusão que variam entre os 52 e os 62 °C, são caracterizadas pelo seu baixo custo, facilidade de aquisição e pela sua baixa viscosidade. Contudo, a sua elevada contração é um fator limitativo [23].

As microcristalinas tendem a ter um comportamento bastante plástico e conferem tenacidade à mistura. Estas possuem também ponto de fusão superior ao da parafina, variando entre os 60 e os 90 °C [23; 26].

### **2.2.5.2 Fabrico aditivo dos modelos perdidos**

Face aos custos elevados das ferramentas para a produção de modelos em cera, o recurso ao fabrico aditivo é ideal para o desenvolvimento de um protótipo e/ou para realizar alguma alteração ao design de uma peça. Para isso, contribui o fato de possuir a capacidade de criar modelos com elevada complexidade, sem necessitar de uma moldação. Para obter um modelo por fabrico aditivo é necessário seguir os passos representados na Figura 2.16.

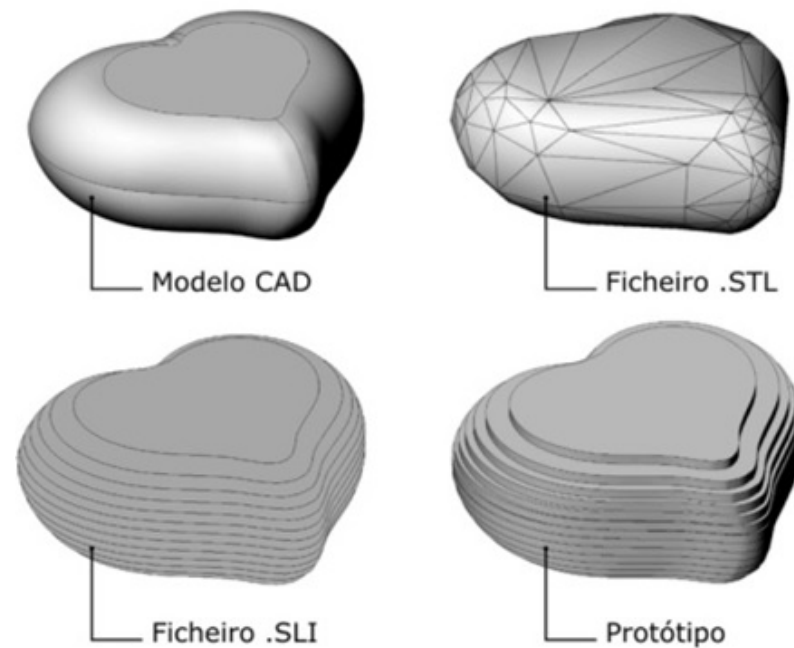


Fig. 2.16: Etapas para obter um modelo por fabricação aditiva [27]

Na Tabela 2.6, apresentam-se os vários tipos de fabricação aditiva utilizados em "investment casting" para a produção de modelos.

Tabela 2.6: Exemplos de processos de fabricação aditiva utilizados em investment casting [28; 29]

Processo	Estado físico do material	Material usado	Observações
SL - Estereolitografia	Líquido	Resina epóxi	Quick Cast promove a poupança de resina, logo a queima do modelo é mais fácil
LOM - Fabricação de objetos por camadas	Sólido	Papel impregnado com cola termoplástica	Em desuso Usado pelo método direto causa problemas na eliminação do modelo na carapaça
FDM - Modelação por extrusão de plástico	Sólido	Polycarbonato, ABS, Ceras	Para investment casting usa-se principalmente a cera
SLS - Sinterização Seletiva a Laser	Sólido	Nylon, Poliestireno Compósitos de matriz polimérica	-
Thermojet	Sólido	Cera	Idêntico ao SL, necessita de suportes para peças em balanço

### 2.2.5.3 Estereolitografia

A estereolitografia, devido ao fato de ser utilizada na parte experimental para projeto de molde de pá de turbina, será abordada em maior detalhe, pois será o processo utilizado para o fabrico de um molde para a injeção de cera destinado à criação de pás de turbina.

Atente-se no capítulo 3.2.1 onde se descreve todo o processo de desenvolvimento do molde.

Dos processos de fabrico aditivo, é o mais antigo e mais utilizado, sendo patenteado em 1986 por Charles Hull, co-fundador da *3D Systems, Inc.* Este processo consiste na obtenção de uma modelo através da fotopolimerização de uma resina epoxídica líquida [27].

O equipamento de SL é constituído por quatro partes fundamentais:

- Tanque, onde está armazenada a resina epoxídica líquida;
- Plataforma perfurada;
- Laser ultravioleta;
- Computador que controla o laser e a plataforma.

O funcionamento da máquina está assente na incidência de um raio laser ultravioleta na resina provocando a sua fotopolimerização. A sua extensão depende da potência do laser, do seu diâmetro e da velocidade de varrimento. O modelo é construído camada a camada, estando o modelo final mergulhado em resina líquida [27].

Finalizada a construção do modelo, este deve ser removido do tanque para a realização do processo de pós cura num forno ultravioleta. De seguida são efetuadas operações de acabamento, como lixagem e/ou polimento ou pintura [27].

Atente-se a Figura 2.17, onde se encontra esquematizado o processo de estereolitografia e os vários componentes de um equipamento.

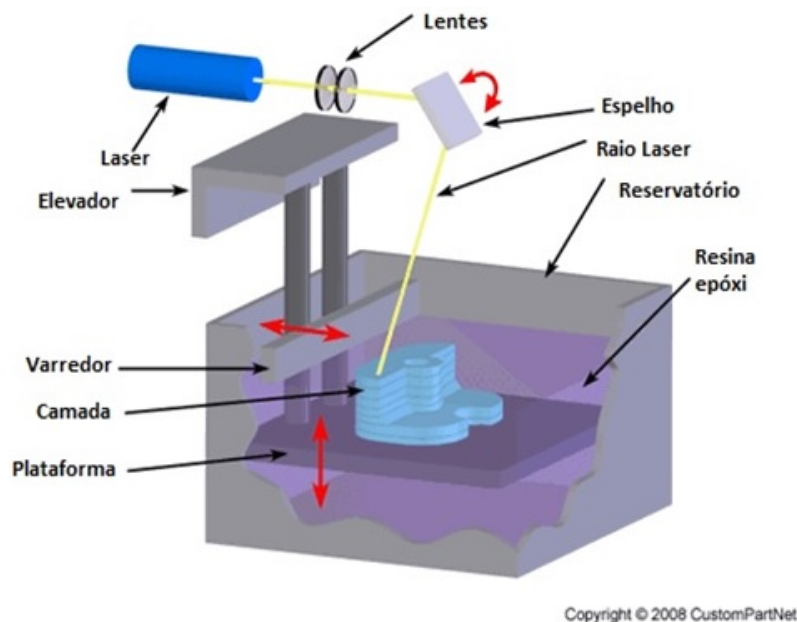


Fig. 2.17: Esquema de equipamento de SL com os vários componentes [30]

Este processo apresenta como vantagens [27]:

- Muito boa precisão dimensional;
- Obtenção de modelos com geometrias muito complexas e com detalhes mais finos;

- Densidades máximas absolutas obtidas com resinas resistentes a altas temperaturas, rígidas, flexíveis, etc.
- Obtenção de modelos parcialmente ocos "*Quick Cast*", como constata a Figura 2.18, reduzindo os custos de produção e possibilitando a sua utilização em fundição de precisão;



Fig. 2.18: Exemplo de peça feita por "*Quick Cast*" que foi partida propositalmente para demonstrar a superfície oca [31]

- Óptimas superfícies de acabamento após lixagem e polimento, como indica a Figura 2.19.



Fig. 2.19: Aspeto final de peça em estereolitografia [32]

As desvantagens do processo são as seguintes [27]:

- Fraca resistência mecânica dos componentes;
- Tempo de produção relativamente elevado;
- Custo total elevado dos modelos;
- Necessidade de pós cura;
- Propensão a empenos.

### 2.2.6 Construção das carapaças cerâmicas

As carapaças cerâmicas possuem um papel bastante importante no processo de fundição de precisão, pois possibilitam o fabrico de peças com detalhes finos e elevada precisão dimensional. Estas para serem utilizadas em *investment casting* necessitam de preencher determinados requisitos de modo a evitar defeitos nas carapaças que implicam elevados custos e atrasos na produção das peças. Os requisitos são [21]:

- Possuir resistência mecânica em "verde" suficiente para suportar a descerificação sem se destruir;
- Ser resistente o suficiente para suportar as pressões metalostáticas do metal fundido;
- Ser capaz de resistir aos choques térmicos, de modo a evitar a fratura durante o vazamento;
- Ser quimicamente estável, com intuito de evitar ou minorar reações na interface metal/refratário);
- Apresentar uma boa permeabilidade, para permitir a expulsão do ar por entre as camadas de barbotina durante o vazamento, de modo a evitar defeitos;
- Deter a condutividade térmica necessária, para que haja uma transferência de calor constante pelas paredes durante o arrefecimento;
- Apresentar fluência limitada para prevenir alterações dimensionais no interior da carapaça que possam inutilizar a peça.

A construção da carapaça é a etapa mais longa do processo de fundição de precisão, feita a partir dos cachos com os modelos em cera, sobre o qual são aplicadas várias camadas de barbotina, sendo feita de seguida a pulverização de pós cerâmicos.

Esta etapa do processo é constituída pelas seguintes fases [33]:

1. Limpeza dos cachos para retirar o desmoldante aplicado na altura da injeção. Esta é efetuada através da lavagem do cacho com um agente desengordurante que promove a aderência da barbotina à superfície dos modelos;
2. Imersão do cacho numa barbotina cerâmica colocada numa tina rotativa para evitar a deposição das partículas cerâmicas, como exemplifica a Figura 2.20;



Fig. 2.20: Imersão de cacho em barbotina [34]

3. O cacho é retirado da barbotina e rodado de modo a remover o excesso de material de modo a haver uma homogeneidade de barbotina na superfície do modelo;
4. Imediatamente após é feita a pulverização de pós cerâmicos com recurso a um chuveiro de areias cerâmicas ou através do mergulho num leito fluidizado, tal como se visualiza na Figura 2.21;



Fig. 2.21: Pulverização de pós cerâmicos no cacho [34]

5. A carapaça deve permanecer 4 horas a secar e a endurecer;
6. As etapas anteriores devem ser repetidas até a carapaça obter a espessura desejada, idêntica à existente na Figura 2.22.



Fig. 2.22: Aspeto final da carapaça cerâmica [34]

A primeira camada a que o cacho é sujeito, é designada por *facecoat*. Esta camada estará em contacto com o metal vazado, reproduzindo cada detalhe do modelo e conferindo a excelente qualidade superficial à peça final. Para obter essa excelente qualidade superficial é necessário que os pós cerâmicos apresentem uma granulometria bastante reduzida e que sejam quimicamente inertes de modo a não haver contaminação do metal.

As camadas seguintes são denominadas de *backup*. Estas têm como propósito conferir resistência mecânica à carapaça para que esta possa ser manuseada e também para suportar os esforços a que estará sujeita ao longo do processo. Em relação ao tamanho de grão das camadas de backup, poderá ser maior pois as camadas posteriores ao *facecoat*

não estarão em contato com o metal vazado. O número de camadas necessárias são 6 a 8 [21; 35].

Por fim é dada uma última camada designada por banho de selagem. Esta camada tem como propósito evitar a separação das partículas cerâmicas da carapaça, quando esta for manuseada [23].

Na Figura 2.23 é possível visualizar as várias camadas aplicadas sobre o cacho para formar a carapaça.

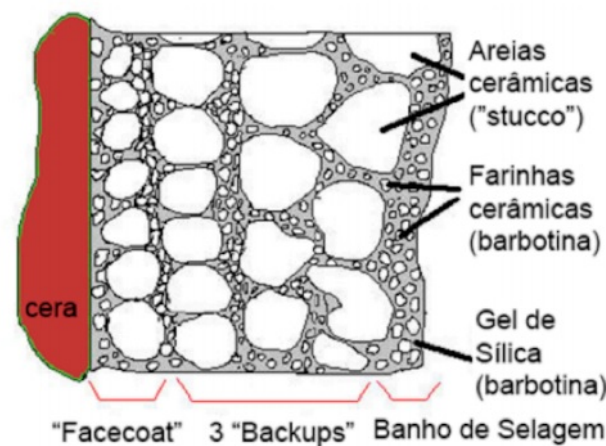


Fig. 2.23: Esquema das várias camadas aplicadas aos cachos em cera [29]

A secagem das camadas deve ser realizada com recurso a ventiladores e em ambiente com temperatura e humidade controladas, estando os cachos suspensos.

### 2.2.7 Compostos cerâmicos

Os compostos cerâmicos, utilizados para o fabrico dos revestimentos dos modelos em cera, devem ser seleccionados de acordo com os seguintes parâmetros [36]:

- Pureza;
- Refratariedade;
- Estabilidade química;
- Expansão térmica;
- Forma das partículas e sua distribuição granulométrica;
- Disponibilidade;
- Custo.

São vários os cerâmicos utilizados em fundição por cera perdida. Contudo, para a presente dissertação importa realçar os refratários usados para *investment casting* de ligas TiAl no INEGI. Assim sendo, destacam-se os seguintes refratários:

- Ítria ( $Y_2O_3$ );



- Zircónia ( $ZrO_2$ );
- Alumina ( $Al_2O_3$ ).

É de referir que várias dissertações realizadas no INEGI abordaram temas relacionados com os refratários utilizados no processo de *investment casting*, intituladas por "Desenvolvimento do Fabrico de Próteses por Fundição de Precisão à Medida do Paciente", escrita por Félix [37], "Estudo da reatividade das ligas de titânio e aluminetos de titânio com os refratários de carapaças cerâmicas", realizada por Barrigana [29] e "Otimização do processo de obtenção de peças em aluminetos de titânio por fundição de precisão" efetuada por Torres [33].

#### 2.2.7.1 Refratariedade

Entendem-se por materiais refratários, como materiais característicos por possuírem elevadas temperaturas de fusão que não sofrem alterações físicas e químicas quando operam a altas temperaturas. Quando sujeitos a temperaturas a rondar 3/4 da sua temperatura de fusão as suas propriedades mecânicas deterioram-se, sendo esse valor de temperatura conhecido por temperatura de amolecimento [13].

Na Tabela 2.7 é possível observar as temperaturas de fusão e de amolecimento dos refratários acima destacados. É também possível verificar que as temperaturas de amolecimento destes cerâmicos é superior à temperatura de fusão das ligas  $\gamma$ -TiAl (1460°C) referida no capítulo 2.1.3.

Tabela 2.7: Valores de temperaturas de fusão e amolecimento dos cerâmicos referidos [33]

Cerâmico	Temp. fusão (°C)	Temp. amolecimento (°C)
Ítria ( $Y_2O_3$ )	2415	1855
Zircónia ( $ZrO_2$ )	2710	2010
Alumina ( $Al_2O_3$ )	2072	1540

#### 2.2.7.2 Estabilidade química

Os refratários selecionados para a construção da carapaça para *investment casting* de ligas TiAl devem ser o mais inertes possível nomeadamente para a camada de *facecoat* de modo a não haver reações na interface metal líquido/cerâmico.

#### 2.2.7.3 Estabilidade térmica

Quantificar os coeficientes de expansão térmica e de condutividade térmica dos vários cerâmicos é imperativo para fazer uma seleção acertada do refratário a usar. Estas propriedades são de extrema importância visto que irão definir se a carapaça cerâmica, aquando do vazamento do metal fundido, garante excelente precisão dimensional e evitar deformações na carapaça. Deste modo é necessário que o cerâmico a utilizar na camada de *facecoat* apresente coeficiente de expansão térmica baixo combinado com uma condutividade térmica alta de modo a dissipar o calor libertado pelo metal fundido. Relativamente às outras camadas de revestimento, o coeficiente de expansão térmica não é relevante pois a função

das camadas de *backup* é apenas conferir resistência mecânica às carapaças. Atente-se na Tabela 2.8 com os valores das propriedades térmicas referidas.

Tabela 2.8: Propriedades térmicas dos refratários [33]

Cerâmico	Coef. expansão térmica ( $\times 10^{-6} K^{-1}$ ) 20-1000°C	Condutividade Térmica ( $W m^{-1} K^{-1}$ ) 20°C
Ítria ( $Y_2O_3$ )	8,1	8,0-12,0
Zircónia ( $ZrO_2$ )	10,0	2,5
Alumina ( $Al_2O_3$ )	8,0	28,0-35,0

### 2.2.8 Barbotinas

Entende-se por barbotinas, como uma suspensão constituída por uma mistura de farinha cerâmica num meio aquoso que contém ligantes de modo a controlar a sua homogeneidade e viscosidade. O ligantes têm como função unir partículas cerâmicas suspensas. Essa união, após secagem, irá conferir a resistência necessária para a carapaça suportar os esforços a que estará sujeita ao longo do processo [38].

Para fabricar uma barbotina é necessária a adição da farinha cerâmica ao ligante contido no meio suspensor. Tal é alcançado devido às tinas rotativas onde as barbotinas estão armazenadas, que através da sua constante rotação garantem a homogeneidade, removem as bolhas de ar e evitam a deposição de partículas cerâmicas no fundo do recipiente. Também as farinhas devem ser armazenadas em recipientes em permanente rotação de modo a evitar a sua compactação. Nas Figuras 2.24 e 2.25 encontram-se expostas exemplos de uma tina rotativa e dos recipientes de refratários em rolos de velocidade variável.



Fig. 2.24: Tina rotativa que armazena a barbotina [38]



Fig. 2.25: Recipientes para as barbotinas em rolos de velocidade variável [37]

Para obter uma peça final de qualidade é desejada uma barbotina que apresente uma viscosidade baixa para reproduzir todos os detalhes da mesma. É também recomendável a utilização de partículas cerâmicas finas de modo a obter uma qualidade superficial superior. Contudo, tal tamanho de partículas afeta a permeabilidade da carapaça, podendo este problema ser contrariado com a adição de maior quantidade de ligante [33].

Os constituintes das barbotinas estão dispostos com as seguintes percentagens [23]:

- Ligante sólido: 5-10%;
- Líquido: 15-30%;
- Farinha cerâmica: 60-80%.

#### 2.2.8.1 Ligantes e aditivos

Os ligantes têm como função aglomerar os grãos de farinha mas também conferir a resistência suficiente para suportar as tensões a que estará sujeito durante a sua preparação. Assim sendo, após sinterização a carapaça deverá resistir ao choque térmico, erosão e às pressões metalostáticas do metal líquido [21].

Estes compostos dividem-se em dois tipos [21]:

- Ligantes de natureza orgânica: polímeros de acrilato;
- Ligantes de natureza inorgânica: soluções coloidais como sílica coloidal, ítria coloidal e alumina fumada.

De todos os ligantes acima referidos, a sílica coloidal é o mais utilizado em *investment casting*. Segundo a REMET UK [39], é um ligante seguro, económico, fácil de usar e garante bons resultados quer para barbotinas de *facecoat* quer para de *backup*. Contudo, como é referido mais à frente no capítulo 2.4 referente à reatividade das ligas Ti e TiAl, que este ligante não pode ser utilizado para *facecoat* de ligas Ti e TiAl pois reage com o titânio.

Para além das farinhas cerâmicas e dos ligantes, é possível adicionar componentes à mistura que melhorem o desempenho de uma barbotina, estes podem ser [22; 29]:

- **Fundentes:** baixam a temperatura de sinterização das carapaças;
- **Dispersantes:** evitam a sedimentação das partículas cerâmicas no interior da barbotina;
- **Espessantes:** aumentam a viscosidade da barbotina, prevenindo a ocorrência de escorridos;
- **Agentes molhantes:** baixam a tensão superficial da barbotina e provocam a sua adesão ao modelo em cera. São escolhidos em conformidade com o ligante utilizado e com a quantidade de espuma que geram na barbotina. São classificados como positivos, neutros ou negativos de acordo com a sua carga iónica;
- **Anti-espumantes:** eliminam a espuma e o ar no interior da barbotina. A existência de ar influencia a medição da densidade e da viscosidade da barbotina.

## 2.2.9 Formulações cerâmicas para ligas Ti e TiAl

### 2.2.9.1 Formulações para camada de *facecoat*

Nos últimos anos foram desenvolvidas várias dissertações que abordaram o tema das formulações cerâmicas para ligas Ti e TiAl. Entre elas, destaca-se a dissertação realizada por Barrigana "Estudo da reatividade de ligas de titânio e aluminetos de titânio fundidos com os refratários de carapaças cerâmicas". De acordo com Barrigana [29], as formulações menos reativas para ligas Ti e TiAl existentes no INEGI são as seguintes:

- $AY1\%TiO_2$ , composta por um ligante inorgânico com farinha de ítria. É normalmente utilizada para camadas de *facecoat*. Destaca-se por ser a barbotina utilizada no INEGI com menores níveis de reatividade;
- AFZrYC, barbotina constituída por um ligante de alumina fumada e uma farinha de zircónia e ítria chinesa. Tal como a formulação anterior também é utilizada para camadas de *facecoat* para ligas reativas. Relativamente à barbotina  $AY1\%TiO_2$  possui maior nível de reatividade, mas tem como vantagem o seu baixo custo.

Ítria chinesa, trata-se de um tipo de ítria resultante de um processo químico (tamanho de grão inferior a  $7\ \mu m$ ) não fundida e de muito baixo custo (cerca de 5 €/kg) comparativamente com a ítria fundida convencional (150 €/kg). Na Tabela 2.9 apresentam-se as composições das duas formulações anteriormente referidas.

Tabela 2.9: Composição das formulações para *facecoat* [33]

Constituinte	AY1%TiO <sub>2</sub>		AFZrYC	
	Composição	Percentagem mássica (%)	Composição	Percentagem mássica (%)
Ligante	orgânico	10	orgânico	16
Líquido	H <sub>2</sub> O desionizada	6.7	H <sub>2</sub> O desionizada	4
Farinha	Ítria 200 mesh	41.7	Zircónia estabilizada com ítria -200 mesh	64
Farinha	Ítria 325 mesh	41.7	Ítria chinesa $\leq 7\mu m$	16
Fundente	TiO <sub>2</sub> 100 mesh	1% da farinha	-	-
Dispersante	-	0,1% do ligante	-	-
Espessante	-	0,5% do ligante	-	-
Molhante	-	1% do ligante	-	0,05% do ligante
Anti-espumante	-	1% do ligante	-	0,05% do ligante

### 2.2.10 Formulações para camadas de *backup*

Para as camadas de backup, a barbotina utilizada no INEGI para as ligas Ti e TiAl é designada por AFAL. Esta barbotina é composta por farinha de alumina e ligante de alumina fumada, sendo utilizada após camada de *facecoat* de AY1%TiO<sub>2</sub>. Trata-se de uma barbotina que é utilizada quando se necessita de uma carapaça com maior resistência ao choque térmico, ou seja, menor coeficiente de expansão térmica e maior condutividade térmica [28]. Encontram-se na Tabela 2.10 expostos os constituintes da barbotina AFAL.

Tabela 2.10: Constituintes da barbotina AFAL [33]

Constituintes	Composição	Percentagem mássica (%)
Ligante	orgânico	32,55
Líquido	H <sub>2</sub> O desionizada	2,45
Farinha	200 mesh	32,5
Farinha	0-30 $\mu m$	32,5
Anti-espumante	-	0,1% do ligante

### 2.2.11 Defeitos inerentes ao processo

Tal como em todos os processos de fundição existentes, também o processo de cera perdida é susceptível ao surgimento de imperfeições nos produtos finais. Estas imperfeições apenas são apelidadas de defeitos quando comprometem a qualidade final do produto. No entanto, deve ser tida em consideração a possibilidade de reparar tais defeitos caso contrário as peças são rejeitadas. A origem dos defeitos pode advir de uma ou várias causas em simultâneo [40].

No que toca a defeitos, a característica que mais influência possui é a sua compacidade,

pois permite quantificar qual a degradação que poderá causar na peça final. Pois quanto mais compacto for o defeito, menor será a degradação da qualidade da peça. No entanto, a densidade do defeito também é um fator relevante. Caso a densidade dos defeitos seja elevada, mesmo que estes sejam compactos poderão originar um déficit nas propriedades dos produtos [41].

Existe uma grande variedade de defeitos originários da fundição, podendo ser divididos nos seguintes grupos [42]:

- **Inclusões**, podendo ser metálicas ou não metálicas. Na Figura 2.26 apresentam-se exemplos de inclusões;



(a)



(b)

Fig. 2.26: (a) inclusão não metálica devido à presença de escória, (b) inclusão não-metálica cerâmica [42]

- **Defeitos gasosos**, devido à existência de gás no metal líquido, bolhas de ar ou outros gases aprisionadas no metal ou bolhas geradas por machos da moldação (comum na fundição em areia). Na Figura 2.27 observa-se um exemplo de defeito gasoso, neste caso porosidades;



Fig. 2.27: Porosidade devido à existência de gás no metal [42]

- **Fissuração**, sendo dividida em dois tipos: a quente e a frio. A diferença entre ambas consiste no momento em que o defeito ocorre. Atente-se na Figura 2.28 onde se exemplifica tal defeito;

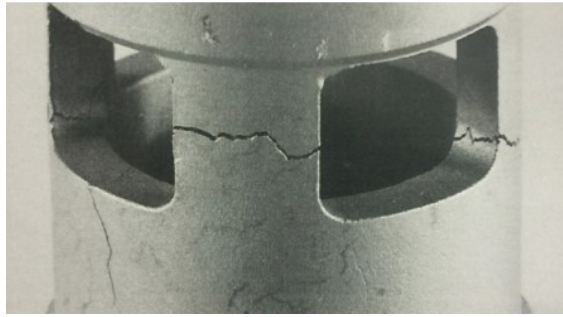


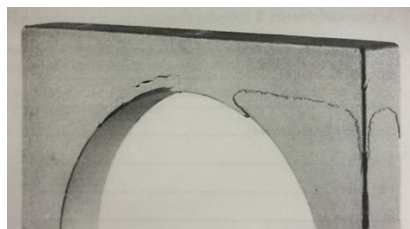
Fig. 2.28: Exemplo de fissuração a quente [42]

- **Defeitos de alimentação**, conhecidos como rechupes acontecem devido ao fornecimento defeituoso de metal líquido durante a solidificação da peça, por parte do sistema de gitagem e alimentação da peça. Na Figura 2.29 constata-se um exemplo de tal defeito;



Fig. 2.29: Rechupe na zona de ataque da peça após corte da mesma [42]

- **Defeitos de forma**, pode ser dividido em dois tipos, juntas frias e peças mal cheias. As primeiras notam-se devido à existência de linhas bem definidas onde se constata que não houve união entre duas ou mais partes devido às baixas temperaturas do metal. Peças mal cheias acontecem devido ao não preenchimento da moldação. Na Figura 2.30 exemplificam-se tais defeitos.



(a)



(b)

Fig. 2.30: (a) Exemplo de uma junta fria, (b) Exemplo de peça mal cheia [42]

## 2.3 Fusão e vazamento

Neste capítulo são abordados os processos de fusão e vazamento das ligas Ti e TiAl. Tais processos devem respeitar os seguintes requisitos [37]:

- Necessidade de realizar a fusão em vácuo ou atmosfera de gás inerte devido à elevada reatividade das ligas Ti e TiAl com o oxigénio e o azoto;
- Devido ao fator explicado no ponto anterior, é fundamental escolher processos que minimizem o contato entre o metal fundido e o cadinho. Os cadinhos devem ser produzidos em refratários inertes em relação as ligas Ti e TiAl.

### 2.3.1 Fusão

Para fazer a seleção de um processo de fusão para uma determinada liga deve-se ter em conta a composição da mesma, a geometria e dimensão da peça a obter e o seu custo [37].

Os principais processos de fusão de ligas Ti e TiAl encontram-se expostos na Tabela 2.11.

Tabela 2.11: Processos de fusão de ligas Ti e TiAl [37]

Tipo de Forno		Tipo de cadinho
Fusão por arco elétrico	Eléctrodo permanente	Cadinho de cobre refrigerado a água
	Eléctrodo consumível	
Fusão por tocha de plasma		
Fusão por indução		Cadinho cerâmico

#### 2.3.1.1 Fusão por arco elétrico com eléctrodo consumível

Este tipo de fusão, também conhecido por VAR (*Vacuum Arc Remelting*), funciona à base da fusão contínua de um eléctrodo consumível, com a mesma composição da liga a fundir, numa câmara de vácuo em atmosfera de gás inerte. Dá-se a fusão quando é gerado o arco eléctrico de enorme potência entre o eléctrodo consumível e o cadinho em cobre arrefecido a água. O calor libertado pelo arco aquece o eléctrodo e o metal sólido, levando à sua fusão e consequentemente a sua deposição no cadinho. O cadinho refrigerado ao arrefecer o metal, origina uma camada solidificada de TiAl que evita o contato entre o metal fundido e o cadinho. Esta camada, designada por *Skull*, impede que o restante metal líquido seja contaminado pelo cadinho. Atente-se na Figura 2.31 onde se encontra esquematizado o aspeto de um forno de fusão deste tipo.



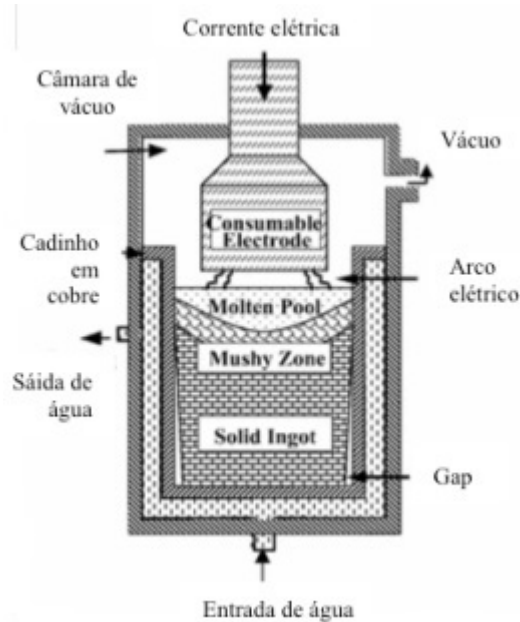


Fig. 2.31: Esquema do aspecto de um forno de fusão por arco elétrico com eletrodo consumível [43]

Apesar deste processo ser o mais utilizado atualmente para a obtenção de fundidos em titânio, apresenta as seguintes desvantagens [33; 37; 44]:

- O processo apresenta um custo bastante elevado;
- Não é possível sobreaquecer o metal líquido devido ao contato constante com o cadinho refrigerado, dificultando o enchimento de peças pequenas e/ou paredes finas;
- Obter a homogeneidade da liga com apenas uma fusão é complicado, sendo normal proceder-se várias vezes à refusão do composto metálico;
- Dificuldade no controlo da potência;
- Necessidade de aplicar tratamento por HIP (*Hot Isostatic Pressing*) de modo a minimizar porosidades nas peças;
- Processo perigoso devido à possibilidade de descontrolo do arco elétrico e perfuração do cadinho.

#### 2.3.1.2 Fusão por arco elétrico com eletrodo permanente

Processo de fusão idêntico ao referido anteriormente, variando no tipo de eletrodo apresentado. Neste caso trata-se de um eletrodo permanente, normalmente de grafite, cobre ou liga de tungsténio. Neste tipo de fusão, coloca-se o metal a fundir diretamente no cadinho de cobre, criando a camada *Skull* após o início do procedimento. É de realçar que o processo, tal como o anterior, é realizado em câmara de vácuo com atmosfera controlada. Relativamente ao processo anterior, este possibilita a mistura de diferentes elementos na carga e a obtenção de algum sobreaquecimento. Contudo, é limitado para a obtenção de peças de pequeno porte, origina alguma heterogeneidade na liga devido à ausência de agitação do banho líquido e também se apresenta como sendo um processo perigoso devido aos mesmos motivos referidos no processo anterior [37].

### 2.3.1.3 Fusão por arco de plasma (PAM)

O surgimento do processo PAM (*Plasma Arc Melting*) deve-se à necessidade de uma alternativa ao processo VAR para a produção de ligas de titânio.

Este tipo de fusão é caracterizado pela utilização de uma tocha de plasma para fundir a liga em causa. O metal ao atingir o estado líquido realiza um movimento horizontal em direção a um recipiente em cobre refrigerado a água. Este recipiente é alimentado de forma contínua, até atingir um nível que leva ao escorrimento de metal líquido para um cadinho também em cobre refrigerado a água, como se pode visualizar na Figura 2.32. A perda de elementos voláteis como o alumínio durante o processo é inferior à que ocorre no processo VAR, devido ao PAM ser realizado totalmente em atmosfera controlada de modo a criar o plasma de hélio. Assim sendo, o processo PAM é o mais indicado para a fusão de ligas TiAl [6].

Tal como nos processos referidos anteriormente, também neste se dá a formação da camada solidificada, *Skull*, entre o metal líquido e o forno de cobre refrigerado a água. A formação desta camada, evita assim a contaminação do metal fundido.

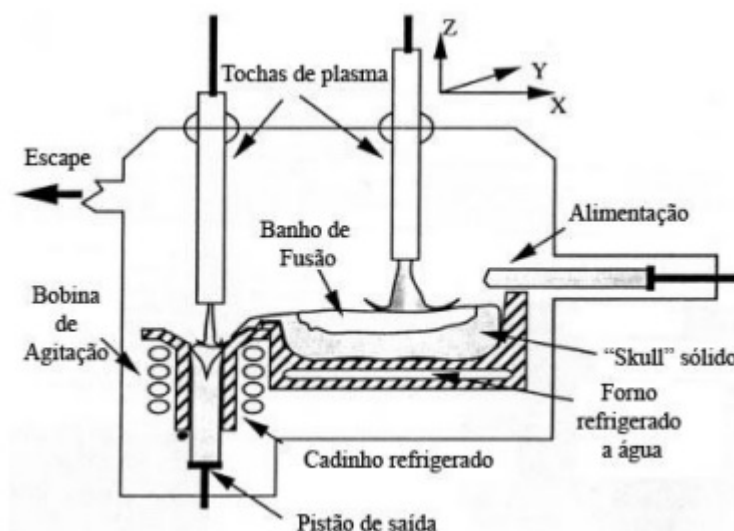


Fig. 2.32: Esquema de um forno de fusão por tocha de plasma [6]

### 2.3.1.4 Fusão por indução em cadinho de cobre refrigerado a água (VISM)

Este processo, contrariamente aos descritos anteriormente, destaca-se por possibilitar um superior sobreaquecimento do metal fundido suscitando uma maior homogeneidade na liga. Esta melhoria deve-se ao fato de a energia gerada pela bobine de indução estar em contato com todo o volume de metal líquido, em vez de se encontrar localizada em apenas uma parte do metal. Outra vantagem desta tecnologia reside no fato de o campo magnético provocar a agitação do banho que também promove a homogeneização do metal líquido. O cadinho deste forno (Figura 2.33), também em cobre refrigerado a água quando em contato com o metal líquido origina, tal como os processos já referidos, a camada protetora que evita a contaminação do metal líquido. Devido a este fato, esta tecnologia é conhecida por *Vacuum Induction Skull Melting* (VISM) [6; 29; 33].

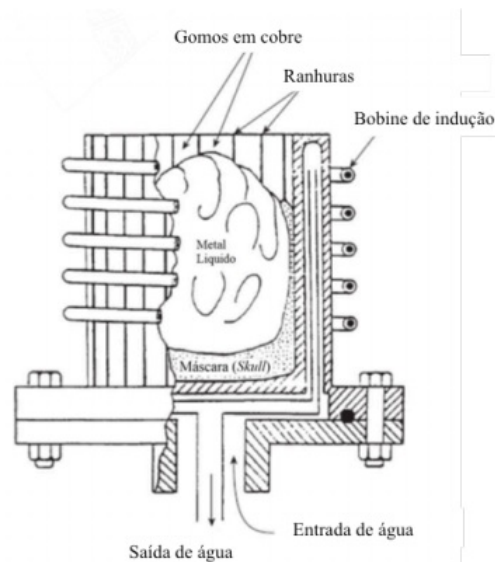


Fig. 2.33: Esquema do aspecto de um forno de indução [6]

Takahashi [45] realizou uma comparação entre vários tipos de cadinho de modo a saber quais os níveis de oxidação no titânio fundido que cada um apresenta. Os vazamentos ocorreram em atmosfera de gás inerte, neste caso o argon. Na Figura 2.34 encontra-se o resultado desse estudo. Pode-se concluir que a criação da camada *Skull* em cadinho de cobre frio leva a que este tipo de cadinho seja o que possui menor percentagem de contaminação (aproximadamente 0%), e também que a ítria é o melhor cerâmico a usar para o fabrico de cadinhos.

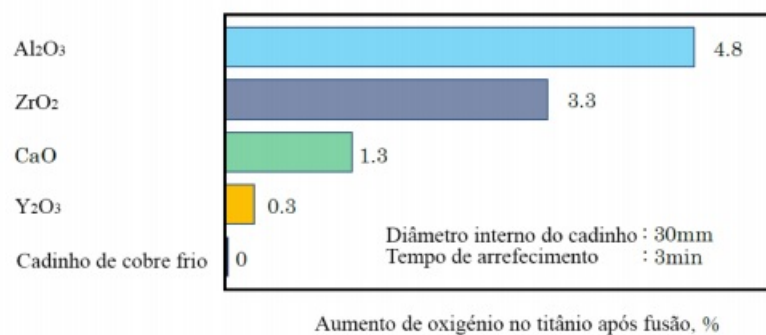


Fig. 2.34: Níveis de contaminação do titânio fundido [45]

A partir deste processo foi desenvolvido o "Levicast" pela *Daido Castings Co. Lda*. Trata-se de um processo de fusão por indução em cadinho frio com semi-levitação, que utiliza o aquecimento do cadinho para induzir uma corrente alternada de elevada frequência, que gera forças de Lorentz que afastam o metal das paredes do cadinho, como se pode observar na Figura 2.35.

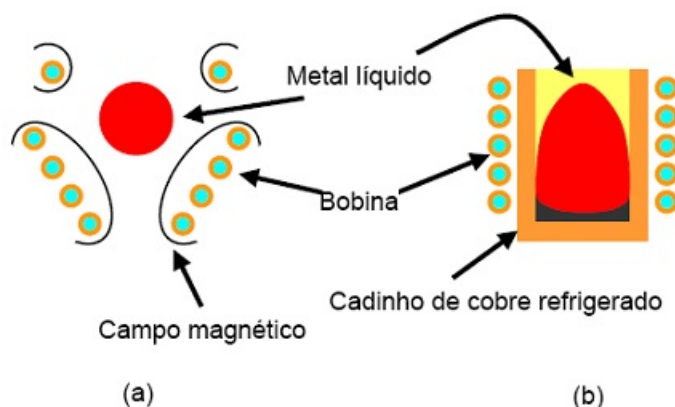


Fig. 2.35: Esquema do funcionamento do processo "Levicast" (a) Levitação total de uma gota de titânio líquido, (b) Levitação parcial num cadinho frio [45]

Contudo, a levitação dá-se apenas na parte superior do cadinho devido ao campo magnético não se gerar totalmente, o que leva a formação da camada *Skull* na parte inferior do mesmo. Não obstante, o fato de o metal não estar em contato com as paredes do cadinho levam a uma diminuição na perda de calor por condução em relação ao VAR, podendo-se assim atingir temperaturas de sobreaquecimento mais elevadas (de 20 °C no VISM para 60-70 °C no "Levicast") [22].

#### 2.3.1.5 Fusão por indução em cadinho cerâmico (VIM)

O processo VIM (*Vacuum Induction Melting*) é caracterizado pela fusão do metal por indução eletromagnética em cadinhos cerâmicos em vácuo e atmosfera controlada. A utilização de cadinho cerâmico traduz-se numa vantagem pois permite atingir temperaturas de sobreaquecimento bastante superiores aos processos anteriormente descritos. Contudo, possui um grande problema que se trata da captação de oxigénio dos refratários para o titânio fundido. Dos vários cerâmicos passíveis de serem utilizados para o fabrico de cadinhos, a ítria é o que apresenta menores níveis de contaminação por oxigénio, estando apenas dependente do tempo a que está em contato com o metal fundido. Na Figura 2.36 encontra-se um exemplo de um cadinho cerâmico com *facecoat* de ítria [29; 46].



Fig. 2.36: Exemplo de um cadinho cerâmico com *facecoat* de ítria [46]

### 2.3.2 Vazamento

No presente subcapítulo é feita uma abordagem aos principais métodos de vazamento utilizados para ligas de TiAl.

#### 2.3.2.1 Vazamento por gravidade

Trata-se do tipo de vazamento mais utilizado na indústria para a obtenção de fundidos. As suas principais vantagens residem no fato de ser simples e barato. No entanto, neste método é suscetível a ocorrência de turbulência como se apresenta na Figura 2.37. Essa turbulência deve-se à elevada velocidade do metal líquido devido a uma altura excessiva de vazamento. Este problema torna este método propício à ocorrência de defeitos como bolhas de ar e óxidos [47; 48].

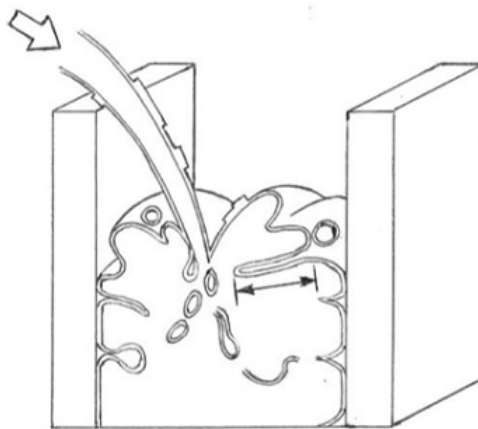
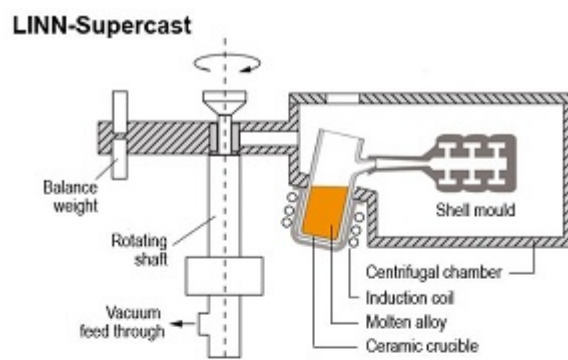


Fig. 2.37: Esquema de vazamento por gravidade, sendo visível a turbulência gerada [48]

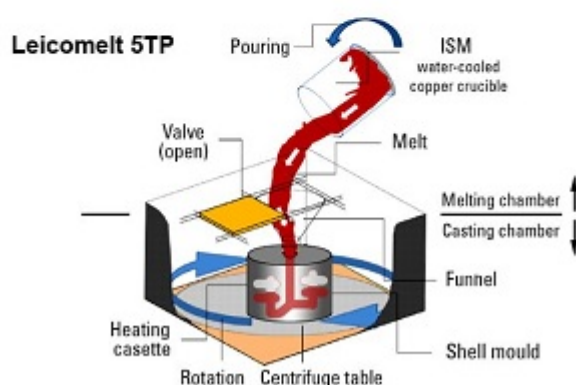
#### 2.3.2.2 Vazamento por centrifugação

Existem duas maneiras distintas de realizar o vazamento por centrifugação, horizontal e vertical, apenas variando o eixo de rotação entre os dois. O vazamento horizontal é direcionado para a obtenção de peças de revolução, enquanto que o vertical destina-se a fundidos que não sejam cilíndricos nem simétricos [6].

Atualmente, no processo de fundição de precisão os principais equipamentos de centrifugação são o *LINN-Supercast* e o *Leicomelt 5 TP*, apresentados na Figura 2.38. Apresentam ambos processos de fusão distintos, o primeiro recorre ao VIM, enquanto que o segundo ao VISM, abordados no capítulo relacionado com a fusão.



(a)



(b)

Fig. 2.38: Ilustração dos principais processos de vazamento por centrifugação. a) LINN-Supercast e b) Leicomelt 5 TP. Adaptado de [46]

No processo *LINN-Supercast* utiliza-se um cadinho cerâmico no qual é colocado o metal a fundir. Este é inserido num braço que irá rodar em concordância com o veio rotativo. Com a rotação e a elevada aceleração do braço, geram-se forças centrífugas que transportam o metal para a carapaça cerâmica. A rotação mantém-se até o metal solidificar sob efeito da pressão gerada pela solidificação. O efeito da centrifugação combinado com o sobreaquecimento do titânio, promove o enchimento de paredes finas até 0,5 mm. No caso de se vazarem uma liga reativa como o TiAl, o processo deve ser realizado em atmosfera de gás inerte, nomeadamente argon [33; 49].

Relativamente ao processo *Leicomelt 5 TP* este é composto por um forno de indução com cadinho de cobre refrigerado a água e molde com mecanismo de rotação axial associado. Este processo é caracterizado por deter duas câmaras, uma para fusão e outra para vazamento. Contudo, o maior desafio existente é o de manter a temperatura de sobreaquecimento gerado durante a fusão durante o vazamento do metal líquido [33].

Um problema que é transversal a este tipo de vazamento é a turbulência gerada devido às altas velocidades atingidas pelo metal líquido durante a centrifugação. Por esta razão o vazamento por centrifugação não é a melhor técnica de vazamento a utilizar [44].

### 2.3.2.3 Vazamento por baixa pressão - CLA, CLV e CLI

Esta técnica de vazamento, também conhecida por vazamento contragravidade, é caracterizada pela baixa turbulência durante o enchimento (contrariamente aos processos de vazamento por gravidade e centrifugação) e pelo fluxo de metal ser promovido na direção do enchimento das peças, o que origina peças de elevada qualidade e menos defeitos, nomeadamente inclusões [44].

O processo em si pode ser dividido em três variantes diferentes:

- CLA - Vazamento do metal ao ar por baixa pressão
- CLV - Vazamento do metal em vácuo por baixa pressão
- CLI - Vazamento do metal em atmosfera de gás inerte por baixa pressão

O CLA por ser realizado ao ar não pode ser utilizado para o vazamento de ligas reativas como TiAl devido às reações metal/atmosfera, logo apenas as técnicas CLV e CLI são usadas para vazamento destas ligas.

O método CLV é constituído por uma câmara onde se encontra posicionada a carapaça cerâmica. Por baixo dessa câmara, encontra-se uma outra onde está situado o metal fundido dentro do cadinho. As duas câmaras são separadas por uma válvula que faz a ligação entre elas.

Ambas as câmaras encontram-se em vácuo para se proceder à fusão da liga. Estando o metal no estado líquido, as câmaras são preenchidas por argon, como demonstra a Figura 2.39 (a).

Posto isto, enquanto que a válvula abre e o cadinho é elevado, é aplicado o vácuo na câmara superior obrigando o fluxo de metal a seguir em direção à carapaça, tal como exemplifica a Figura 2.39 (b).

Por fim, o cadinho desce após a solidificação do metal no interior da carapaça, juntamente com o metal em excesso, como ilustra a Figura 2.39 (c).

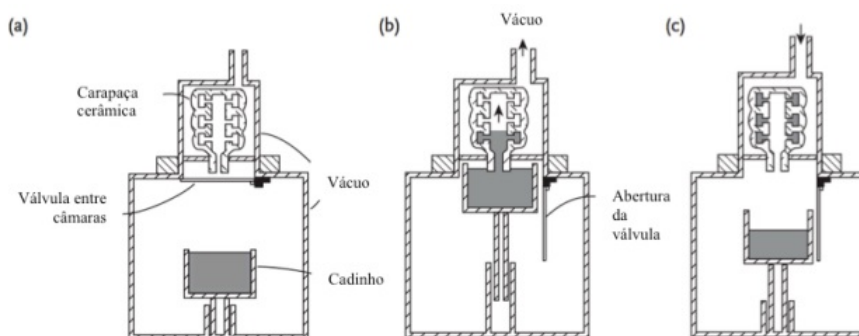


Fig. 2.39: Exemplificação do processo de vazamento CLV [6]

A *Daido* desenvolveu o processo *Levicast* que é bastante idêntico ao CLV, variando apenas no tipo de cadinho utilizado. Este recorre a um cadinho de cobre refrigerado a água. Estando associado ao processo de fusão também com a mesma designação, abordado em 2.3.1.4 [6]. Na Figura 2.40 encontra-se um esquema do processo em si.

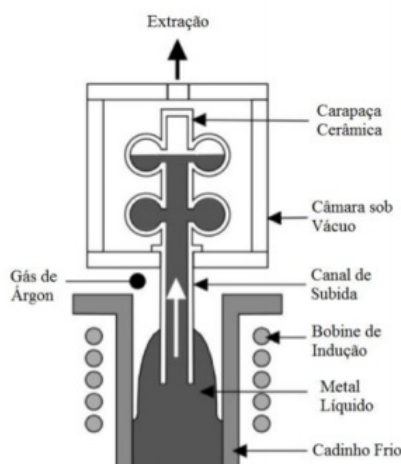


Fig. 2.40: Exemplificação do processo de vazamento Levicast [6]

Relativamente ao método CLI, este possui um princípio de funcionamento igual ao anteriormente descrito. Apenas difere no fato de ser aplicado vácuo apenas na câmara de fusão e de seguida é injetado árgon na mesma. Após a câmara estar totalmente preenchida de árgon, a carapaça cerâmica desce aspirando primeiramente o árgon e só depois se dá o enchimento da mesma com metal líquido, tal como se observa na Figura 2.41. Este método é capaz de realizar o processo de fusão e vazamento de forma mais célere e a custo mais reduzido devido ao menor consumo de árgon [44].

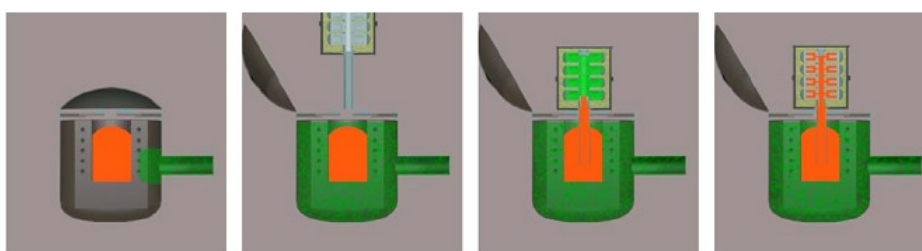


Fig. 2.41: Exemplificação do processo de vazamento CLI [44]

## 2.4 Reatividade das ligas Ti e TiAl

No presente capítulo é abordado um dos principais problemas (senão o principal) no vazamento de ligas Ti e TiAl.

Devido às elevadas temperaturas de fusão das ligas de titânio, existe uma inerente reatividade com a envolvente do metal, como a atmosfera ou a carapaça cerâmica, a altas temperaturas durante o vazamento. A ocorrência destas reações gera problemas nas peças que obrigam a realização de operações de maquinagem, encarecendo assim o produto final.

### 2.4.1 Formação da camada $\alpha$ -case

Apesar de a fundição por cera perdida ser considerado um processo *net shape*, este conceito não pode ser aplicado para as ligas de titânio. Este caso deve ser designado por ser um processo *near net shape*. Isto deve-se ao fato de as ligas Ti e TiAl serem muito reativas o que leva à ocorrência de reações entre o metal líquido e a parede interior da



carapaça cerâmica ou com cadinhos cerâmicos, leva a primeiro à formação de  $TiO_2$  e, em seguida, à solução sólida de oxigênio na superfície do titânio. Ao solidificar, o oxigênio difunde-se a alta temperatura pelo interior da liga criando uma camada endurecida cuja espessura depende dos seguintes fatores [50]:

- Atmosfera de fusão e vazamento;
- Velocidade de arrefecimento;
- Geometria da peça;
- Tempo de contato entre o metal fundido e a carapaça cerâmica;
- Turbulência no vazamento;
- Temperatura de pré-aquecimento.

Assim sendo a profundidade da camada endurecida deve ser estimada aquando do projeto da peça, pois irá ser removida no fim do processo. A formação desta camada, designada por  $\alpha$ -case, origina os seguintes problemas:

- Redução da resistência à fadiga e ductilidade [50];
- Aparecimento de fendas e respetiva propagação [51];
- Fragilização da liga metálica, devido à alteração da microestrutura na superfície do fundido [29];

De forma a evitar ou minimizar a formação do  $\alpha$ -case deve ser feita uma seleção adequada de um refratário pouco reativo e também proceder-se à fusão e vazamento em atmosfera de gás inerte, de modo a não haver contaminação na interface metal/atmosfera. Para selecionar o refratário a utilizar deve-se ter em conta a energia livre de formação dos óxidos, sendo o óxido de referência o  $TiO_2$ , ou seja, o refratário a ser usado para revestimento dos modelos deve apresentar energia mais negativa que a formação do dióxido de titânio.

#### 2.4.1.1 Energia livre de formação ou de Gibbs

Entende-se por energia livre de Gibbs ( $\Delta G$ ) como sendo uma medida de potencial termodinâmico que faz com que uma reação aconteça. Quando um valor de  $\Delta G$  é negativo significa que a reação ocorre no sentido direto, enquanto que um valor positivo representa o contrário. O sistema encontra-se em equilíbrio quando  $\Delta G = 0$ . Posto isto, a equação que define a energia livre de formação de um elemento a temperatura constante é a seguinte:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

Correspondendo o  $\Delta H$  à variação de entalpia do sistema, T a temperatura absoluta e  $\Delta S$  a variação de entropia.

Com base nestes pressupostos foi criado um diagrama de Ellingham com os óxidos cerâmicos utilizados para a construção das carapaças cerâmicas no *investment casting*. Na

Figura 2.42 apresenta-se o respetivo diagrama. Contudo, este não reflete totalmente a capacidade redutora das ligas TiAl, mas sim do Ti [29].

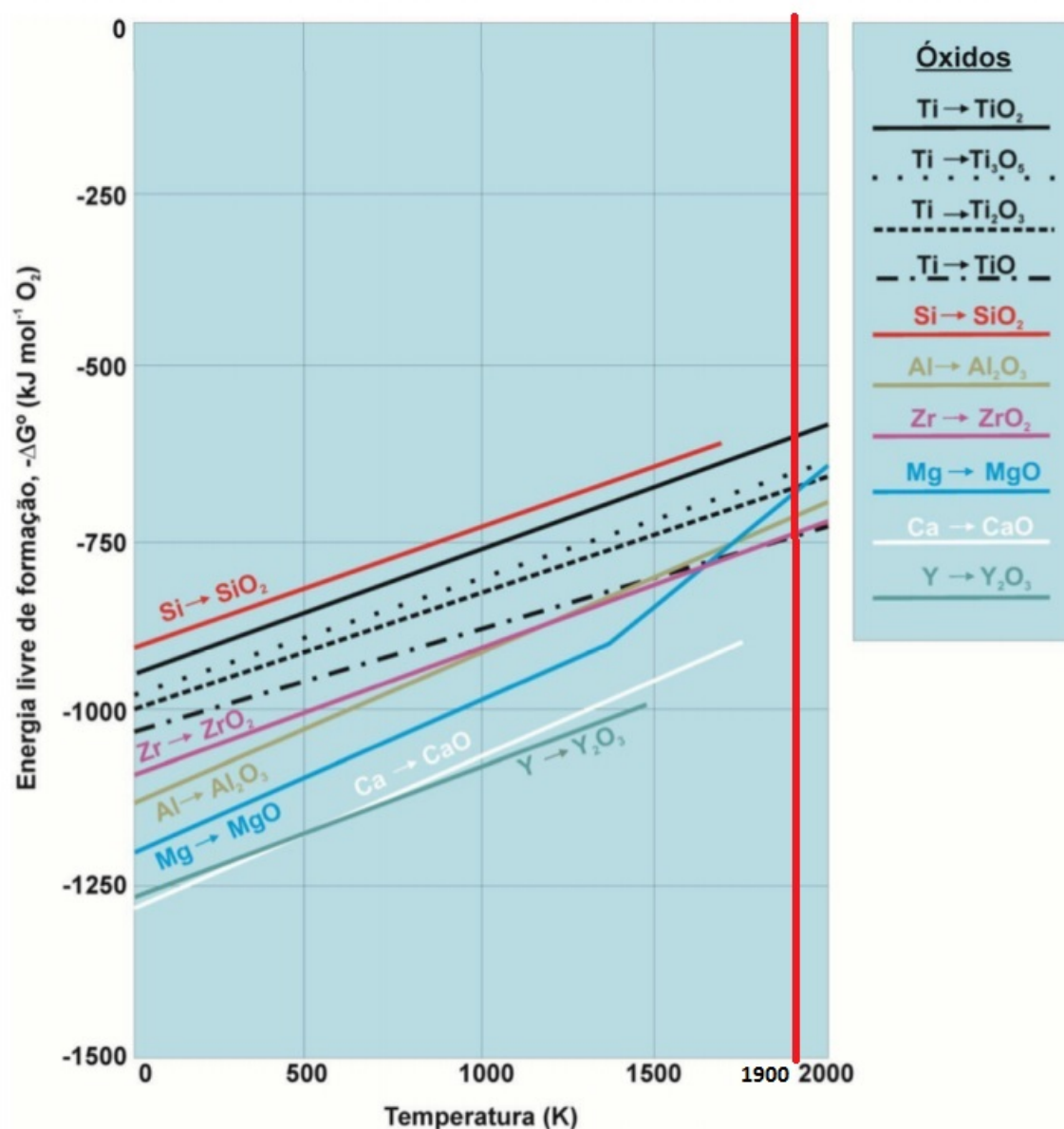


Fig. 2.42: Diagrama de Ellingham [33]

Analisando o respetivo diagrama, encontra-se relacionada a energia livre padrão de formação ( $\Delta G^0$ ) com a temperatura. Entende-se por  $\Delta G^0$  como sendo a variação da energia de Gibbs para uma reação que ocorre sob a seguinte condição [33; 52]:

- As pressões parciais de quaisquer gases envolvidos na reação é de 0,1 MPa.

É também possível observar que todos os óxidos do diagrama apresentam energia livre de formação negativa. Quanto menor for esse valor maior será a sua estabilidade térmica. Deste modo, um óxido que se apresente próximo do topo é um óxido instável e facilmente redutível. Numa determinada reação, um metal apenas consegue reduzir óxidos que se encontrem acima da sua linha no diagrama [29]. Por exemplo, a alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) encontra-se numa linha abaixo da do TiO<sub>2</sub>, por conseguinte o alumínio reduz o dióxido de titânio

em titânio, contudo o titânio consegue reduzir a alumina dando origem a  $TiO$  (óxido de titânio). Assim sendo, de todos os óxidos existentes no presente diagrama verifica-se que a ítria é o mais estável, ou seja, o menos redutível por parte do  $TiO_2$ .

Barrigana [29], aquando da sua dissertação, realizou uma comparação de reatividade das ligas Ti6Al4V e TiAl, concluindo que ambas apresentaram níveis de reatividade idênticos para carapaças de ítria. Relativamente a carapaças de zircónia, a primeira apresentou níveis de reatividade superiores à segunda. Enquanto que para uma carapaça de alumina com pó de titânio a liga TiAl foi a que deteve superior reatividade. Deste modo, a liga TiAl confirmou-se como sendo menos reativa que a liga Ti6Al4V e também que a ítria é o cerâmico ideal para carapaças destinadas a fundidos em ligas à base de titânio.

Tetsui *et al.* [53] realizaram um estudo idêntico mas para a liga Ti-46Al, confirmando, tal como o diagrama presente na Figura 2.42, a ítria como o refratário menos reativo quando exposto ao titânio líquido. Tal facto é comprovado pela Figura 2.43, onde se compara a concentração de oxigénio e dureza da camada  $\alpha$ -case apresentada por cada um dos refratários estudados.

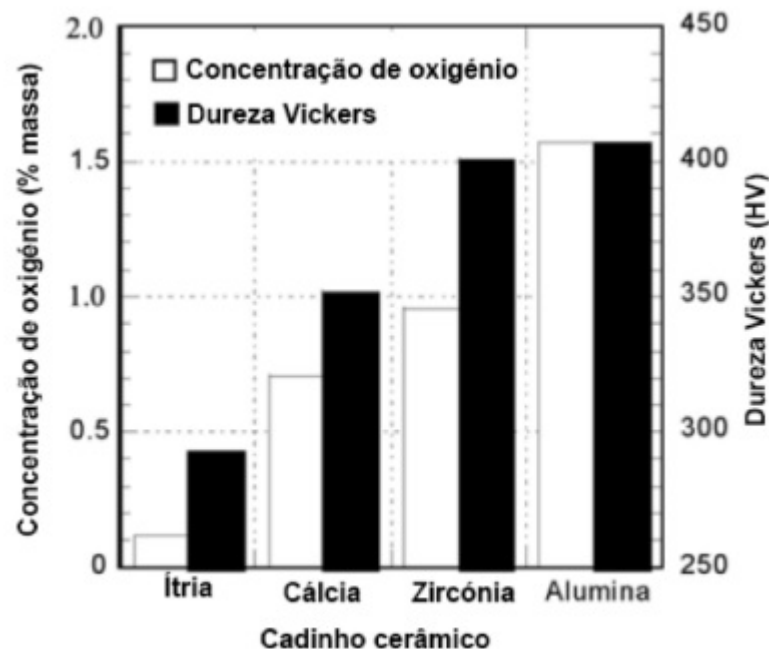


Fig. 2.43: Estudo comparativo relativamente à concentração de oxigénio e dureza da camada  $\alpha$ -case da liga Ti-46Al fundida em diferentes tipos de cadinhos cerâmicos [53]

Guilin *et al.* [54] efetuaram uma comparação entre provetes cilíndricos com 5 mm de diâmetro e 40 mm de comprimento em titânio puro com revestimentos de  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  e MgO. Todas as amostras foram sinterizadas a 850 °C durante uma hora e depois arrefecidas a 200 °C antes de realizar o vazamento em atmosfera com argón, a 1700 °C. Na Figura 2.44 encontra-se uma microestrutura de uma secção do provete.

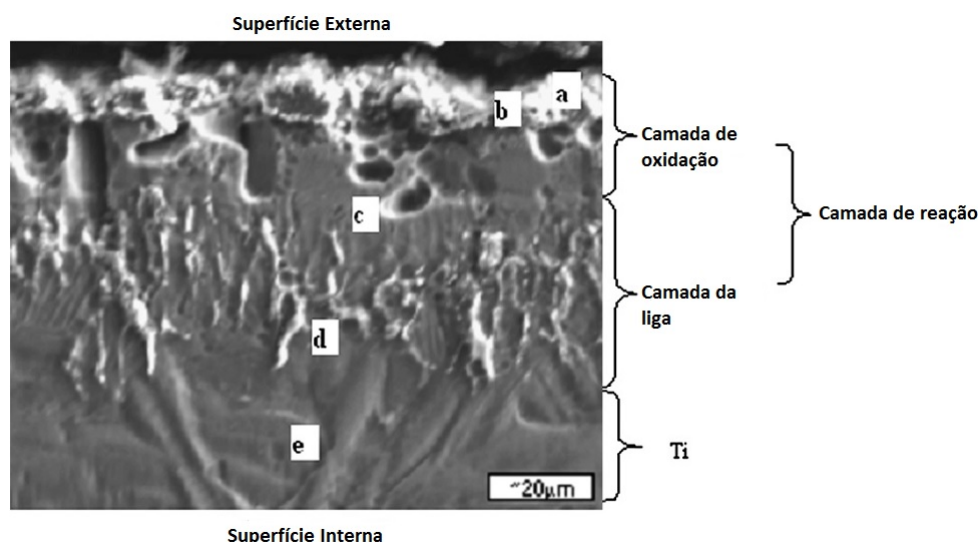


Fig. 2.44: Microestrutura SEM da camada *alpha-case* no provete de titânio puro com revestimento de  $SiO_2$  [54]

Nesta figura encontram-se letras de a a e, o significado das mesmas prende-se com locais de profundidade crescente da superfície até ao núcleo do provete. Na Tabela 2.12 encontram-se os constituintes em cada local legendado.

Tabela 2.12: Constituantes da camada *alpha-case* no titânio revestido por  $SiO_2$  [54]

Local	Constituinte (%)		
	O	Si	Ti
a	66	34	0
b	63	30	7
c	0	2	98
d	0	1	99
e	0	0	100

Nessa secção encontra-se uma camada reativa com uma profundidade de aproximadamente  $80 \mu m$  que pode ser separada em duas camadas. A primeira camada é uma camada de oxidação, ou seja a porção de metal que está em contato com a moldação, esta possui uma profundidade de  $30 \mu m$ , sendo constituída por  $SiO_2$  e  $TiO_2$ . A outra camada o autor designa por camada da liga, ou seja uma camada mais interior e onde não se dá a difusão de oxigénio, possuindo uma profundidade de  $50 \mu m$ , composta por Ti e uma pequena percentagem de Si.

Relativamente aos provetes revestidos com  $Al_2O_3$ , o autor obteve profundidades de camada *alpha-case* de  $50 \mu m$ , também dividida em duas camadas tal como o caso anterior, em que a primeira detinha  $10 \mu m$ , sendo composta por  $Al_2O_3$ ,  $Al_2TiO_5$  e  $Ti_xO_y$ . Enquanto que a segunda é constituída por Ti, Al e  $TiAl_3$  com  $40 \mu m$ .

Comparativamente aos provetes revestidos com MgO, estes apresentaram uma camada endurecida com  $14 \mu m$  de profundidade. Encontrando-se MgO,  $Al_2O_3$  e  $Ti_xO_y$  na camada exterior de  $4 \mu m$  de profundidade e na outra camada Ti e Al.

Pode-se então dizer que os resultados obtidos por Guilin *et al.* [54] vão de encontro

com o diagrama de Ellingham apresentado, ou seja, dos óxidos utilizados pelo autor o menos reativo é o  $\text{MgO}$ .

#### 2.4.1.2 Influência do teor de alumínio na formação da camada $\alpha$ -case

Sung *et al.* [55] estudaram a influência da percentagem de alumínio que uma determinada liga detinha na formação da camada  $\alpha$ -case. As ligas em causa possuíam um teor de alumínio compreendido entre 0 e 55%, sendo todas elas revestidas por  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Os autores, com recurso às tabelas termodinâmicas JANAF, realizaram cálculos das energias de Gibbs, concluindo que desta forma não iria ocorrer a formação da camada  $\alpha$ -case. Contudo, deu-se a formação de tal camada devido à contaminação do metal com Al.

Sung *et al.* [55] concluíram que a formação da camada de reação apenas acontece para ligas com teor de Al inferior a 30 at%, enquanto para valores superiores não é perceptível a formação dessa camada. Observando a Figura 2.45 é possível referir que quanto maior a percentagem de Al menor será a possibilidade de formação de camada  $\alpha$ -case.

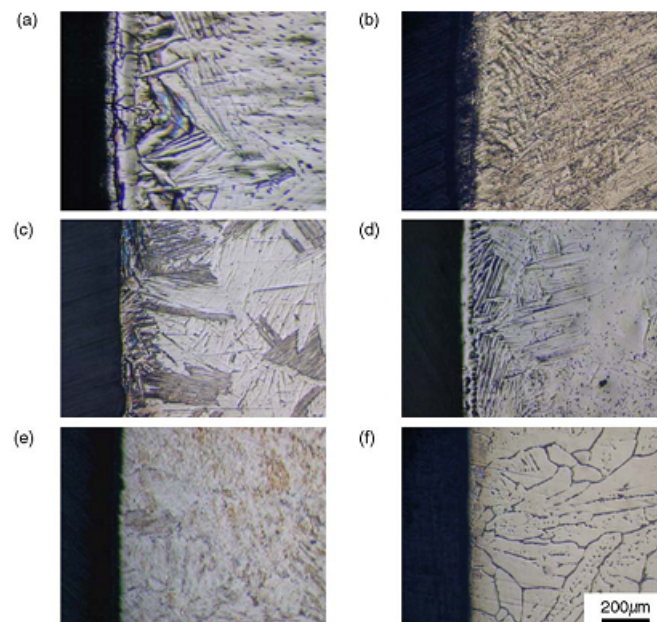


Fig. 2.45: Imagens da interface metal/carapaça para ligas com diferentes teores de Al: a)cp Ti, b) Ti-10Al, c)Ti-30Al, d)Ti-40Al, e) Ti-47Al e f) Ti-55Al [55]

De acordo com a Figura 2.46 pode-se observar que a dureza das ligas com teores de alumínio inferiores a 30 at% sofrem grandes variações consoante a profundidade da liga, enquanto que para teores superiores a 30 at% isso não acontece, logo é um indicador de que não houve formação de camada  $\alpha$ -case.

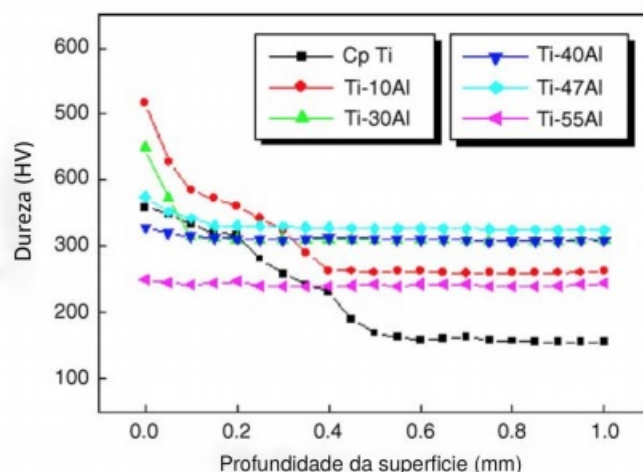


Fig. 2.46: Perfil de durezas para as várias ligas com diferentes percentagens de alumínio [55]

### 2.4.1.3 Formação da camada $\alpha$ -case térmico

Para além da camada  $\alpha$ -case se formar devido à contaminação do metal devido à difusão de oxigénio e outros constituintes, Guilin *et al.* [54] reporta o surgimento de uma nova camada, denominada pelos autores por camada endurecida. Trata-se de uma camada de titânio com uma dureza superior à liga mãe, com maior profundidade do que a camada reativa, ou seja situada entre esta e o titânio inalterado (Figura 2.47). Este endurecimento, explica o autor, deve-se ao rápido arrefecimento nesta zona do metal, sendo idêntico a uma têmpera.

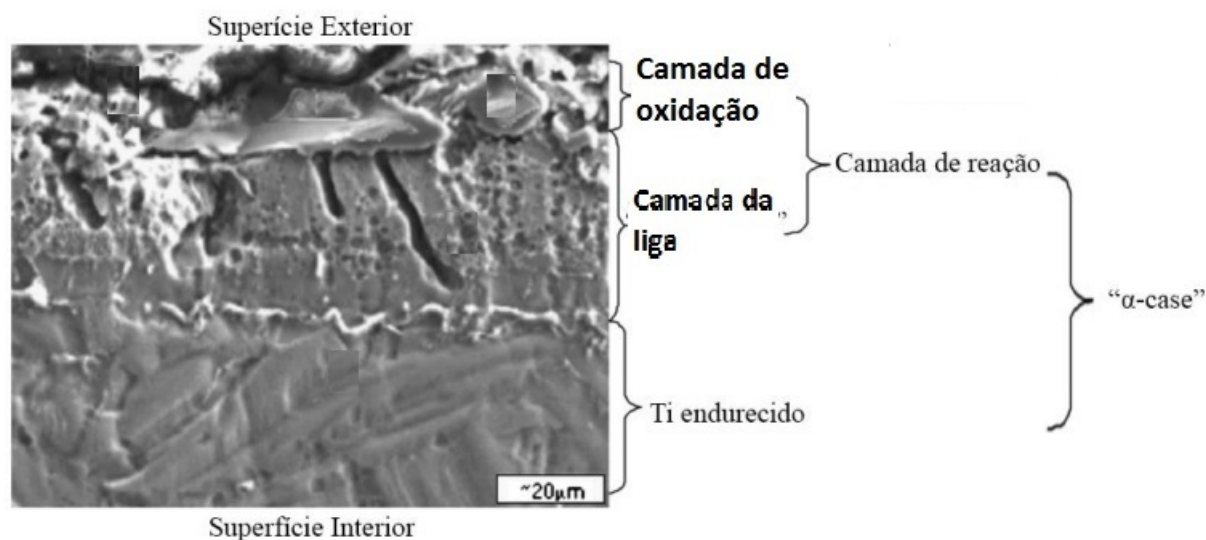


Fig. 2.47: Microestrutura SEM da camada alfa case no provete de titânio puro com revestimento de  $Al_2O_3$  [54]

Bauristhene *et al.* [51], num estudo sobre a formação da camada  $\alpha$ -case em provetes maquinados da liga Ti-6Al-4V revestida por uma mistura de ítria com zircónia estabilizada, concluíram que existe uma relação entre a formação de uma camada endurecida e a temperatura do forno onde foram colocadas as amostras. Na Figura 2.48 é possível

concluir que para uma temperatura de 1400 °C a camada apresenta uma maior dureza à superfície relativamente a outras temperaturas. Essa dureza vai diminuindo à medida que a profundidade da camada vai aumentando. O mesmo sucede para temperaturas de 1000 e 1200 °C.

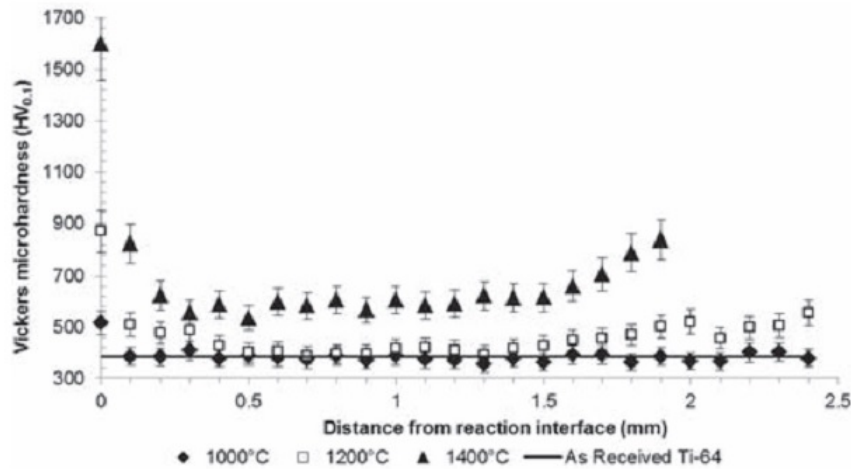


Fig. 2.48: Dureza dos provetes em Ti-6Al-4V em função da profundidade da camada endurecida [51]

Deste modo, os autores concluíram que a extensão da camada  $\alpha$ -case térmico aumentou de 35  $\mu\text{m}$  para 161  $\mu\text{m}$  com o aumento da temperatura de 1000 para 1400 °C. Também, tal como era esperado por se tratar de um revestimento à base de ítria, as amostras apresentaram baixos níveis de contaminantes como O, Y, Zr and C [51].

## 2.5 Maquinagem química

No presente capítulo será abordado o tema principal da presente dissertação em que será feita uma exposição detalhada do processo de maquinagem química.

A maquinagem química é um processo que tem sido utilizado desde os anos 50, sendo caracterizado pela utilização de soluções ácidas ou básicas de caráter forte para a dissolução de metais tais como titânio, alumínio, aço, etc. Sendo principalmente utilizado pela indústria aeronáutica, este tipo de maquinagem tem como propósito a remoção de material dos painéis de avião com formas complexas de modo a torná-los o mais leves possível, com o intuito de melhorar a eficiência dos mesmos. O processo envolve a remoção de toda a superfície ou de áreas específicas. Para a remoção de áreas específicas, são utilizadas máscaras em toda a superfície da peça a maquinar, sendo posteriormente removidas as áreas da peça que irão ser maquinadas, como se pode observar na Figura 2.49 [56; 57].





Fig. 2.49: Pannel de avião com máscara aplicada nas zonas onde não é desejada a maquinagem química [57]

Estas máscaras podem ser de dois tipos diferentes, à base de água ou de um solvente (como percloroetileno). A utilização de um tipo em detrimento do outro tornou-se num dilema para a indústria aeronáutica, pois enquanto que o primeiro é amigo do ambiente, o segundo tem como vantagem ser competitivo a nível económico [58]. Na Tabela 2.13, expõe-se um comparativo entre os dois tipos de máscaras.

Tabela 2.13: Matriz de decisão entre tipo de solvente a utilizar [58]

	Máscara à base de:	
	Água	Solvente
Necessidade de controlo ambiental	Não	Sim
Custo por litro	Elevado	Baixo
Utilização industrial	Baixa	Elevada
Custo inicial	Baixo	Elevado
Custo operacional	Baixo	Elevado

Para que uma máscara possa ser utilizada no processo, esta deve preencher os seguintes requisitos [57]:

- Ser resistente quimicamente em relação à solução a utilizar;
- Ser fácil de remover em zonas seletivas antes de maquinar e totalmente após o término do processo.

Este tipo de processo é passível de ser utilizado em vários tipos de ligas, desde titânio, alumínio, aço, etc. Os ácidos utilizados diferem consoante a liga a ser maquinada, como se observa na Figura 2.50.



Alloy	Form	Etchant type	Surface finish, $R_a$	
			$\mu\text{m}$	$\mu\text{in.}$
<b>Aluminum</b>				
2024-T3	Sheet, plate, forging	NaOH + Na <sub>2</sub> S	2.5–4.0	100–160
2024-T3	Sheet, plate, forging	NaOH + TEA(a)	1.0–1.5	40–60
2024-T3511	Extrusion	NaOH + TEA(a)	2.0–4.0	80–160
7075-T6	Sheet, plate, forging	NaOH + Na <sub>2</sub> S	2.5–4.0	100–160
7075-T6	Sheet, plate, forging	NaOH + TEA(a)	1.0–1.5	40–60
2219-T37	Sheet, plate	HCl	1.5–2.5	60–100
2219-T87	Sheet, plate	NaOH + Na <sub>2</sub> S	3.2–5.0	125–200
2219-T87	Sheet, plate	NaOH + TEA(a)	3.2–5.0	125–200
A-356	Castings	NaOH + additives	6.3–12.5	250–500
<b>Mild steels</b>				
1010, 1020	Sheet, plate	HNO <sub>3</sub>	3.2–5.0	125–200
<b>Low-alloy steels</b>				
4130, 4340	Sheet	HNO <sub>3</sub>	1.0–2.0	40–80
4130, 4340	Forgings	HNO <sub>3</sub>	1.0–2.0	40–80
<b>High-alloy steels</b>				
H-11	Sheet	HNO <sub>3</sub> , HCl, HF	1.5–3.2	60–125
<b>Stainless steels</b>				
301, 304, 316, 321	Sheet	HNO <sub>3</sub>	0.75–1.5	30–60
347	Sheet	HNO <sub>3</sub>	0.75–1.5	30–60
410	Sheet	HNO <sub>3</sub>	1.0–1.5	40–60
<b>PH steels</b>				
13-8, 15-7, 17-7	Sheet	HNO <sub>3</sub> , HCl, HF	0.75–1.5	30–60
AM 350, AM 355	Sheet	HNO <sub>3</sub> , HCl, HF	0.75–1.5	30–60
<b>Superalloys</b>				
N-155	Sheet	HNO <sub>3</sub> , HCl, HF	2.5–3.6	100–140
L-605	Sheet	HNO <sub>3</sub> , HCl, HF	2.5–3.6	100–140
H-188	Sheet	HNO <sub>3</sub> , HCl, HF	1.5–2.3	60–90
Hastelloy B	Sheet	HNO <sub>3</sub> , HCl, HF	1.5–2.3	60–90
Hastelloy C	Sheet	HNO <sub>3</sub> , HCl, HF	1.5–2.3	60–90
Hastelloy X	Sheet	HNO <sub>3</sub> , HCl, HF	1.5–2.3	60–90
Inconel 600	Sheet	HNO <sub>3</sub> , HCl, HF	1.5–2.3	60–90
Inconel 625	Sheet	HNO <sub>3</sub> , HCl, HF	1.5–2.3	60–90
Incoloy 903	Sheet	HNO <sub>3</sub> , HCl, HF	1.5–2.3	60–90
Inconel 718	Sheet	HNO <sub>3</sub> , HCl, HF	1.0–2.0	40–80
René 41	Sheet	HNO <sub>3</sub> , HCl, HF	1.0–2.0	40–80
Waspaloy	Sheet	HNO <sub>3</sub> , HCl, HF	1.0–2.0	40–80
<b>Titanium alloys</b>	Sheet, plate, forging	HF, HNO <sub>3</sub>	0.25–1.0	10–40
	Casting	HF, HNO <sub>3</sub>	0.75–1.5	30–60
<b>Magnesium alloys</b>	Sheet	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1.0–1.5	40–60
<b>Niobium alloys</b>	Sheet	HNO <sub>3</sub> , HCl, HF	1.0–1.5	40–60

(a) The NaOH + TEA etchants normally contain Na<sub>2</sub>S to precipitate out Zn and Cu components in the alloys. If not precipitated out, these metals will plate to the surface being chemically milled, thereby increasing surface roughness.

Fig. 2.50: Tipos de liga passíveis de serem maquinadas quimicamente e respectivos ácidos utilizados e rugosidades obtidas [59]

### 2.5.1 Remoção da camada alpha-case por maquinagem química

No capítulo 2.4.1 abordou-se a formação de uma camada reativa na superfície dos metais à base de titânio que propicia o aparecimento de fendas. Esta camada necessita então de ser removida de modo a que as peças possam respeitar as exigentes normas de qualidade das indústrias aeroespacial e automóvel.

Um dos processos utilizados para a remoção da camada alpha-case é a maquinagem química. Este tem como objetivo remover totalmente a camada endurecida e/ou fazer a remoção de material em peças *near-net shape* de modo a estas atingirem as dimensões de peças *net shape*. Isto é alcançado através da submersão de uma ou mais peças numa solução ácida, que irá atacar a superfície das peças removendo o metal. Para que a remoção seja uniforme, o banho deve ser agitado permanentemente [60].

Relativamente à maquinagem convencional, o processo de maquinagem química apre-

senta as seguintes vantagens [56; 59]:

- Capacidade de remoção de material em peças de geometria complexa;
- Capacidade de maquinar secções muito finas sem causar deformações;
- Capacidade para manter tolerâncias dimensionais apertadas;
- Tamanho da peça só é limitado pelo tamanho do tanque;

Contudo, trata-se de um processo relativamente ineficiente, caro, perigoso devido aos tipos de soluções utilizadas e bastante prejudicial para o ambiente [60].

Para a realização do processo de maquinagem química é necessário ter em consideração diversos fatores, entre eles [59; 60]:

- Tipos de ácidos a utilizar;
- Obter uma taxa de remoção de material elevada;
- Obter uma remoção de material uniforme;
- Eliminar ou evitar a formação de camada frágil de hidrogénio na superfície da peça;
- Peças devem possuir um acabamento brilhante e liso após ataque químico;
- Eficiência do processo;
- Qualidade do ar;
- Capacidade para reciclar os ácidos utilizados, ou neutralizá-los de modo a que quando desperdiçados não sejam agressivos para o ambiente.

#### **2.5.1.1 Soluções ácidas utilizadas no processo de maquinagem química**

Para o ataque químico a peças em ligas à base de titânio, a solução ácida mais utilizada, tal como indica a Figura 2.50, é a combinação de ácido fluorídrico (HF) com ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>). Com percentagens de HF a variar entre 1 e 10%, trata-se de uma solução de cariz forte e com elevadas taxas de remoção de material. Quanto mais ácida for a solução maior será a taxa de remoção de material [60]. A reação entre a solução e o titânio é altamente exotérmica, obtendo-se melhores resultados de remoção de material para temperaturas de banho entre 40 e 60 °C [61]. Este tipo de solução deve ser agitada continuamente de modo a promover uma remoção de material uniforme.

Devido aos perigos associados ao manuseio e transporte do HF, trata-se de um ácido de pH baixo como se verifica na Figura 2.51, este possui maiores custos inerentes relativamente a ácidos mais fracos. Aquando da utilização deste tipo de ácido, deve-se evitar o contato com o mesmo, caso contrário devido ao seu poder corrosivo pode causar problemas no sistema nervoso e paragem cardíaca se entrar na corrente sanguínea. Relativamente ao ácido nítrico, trata-se de um ácido menos perigoso (com pH de cerca de 3), quando em contato com a pele, torna-a amarela. [60]

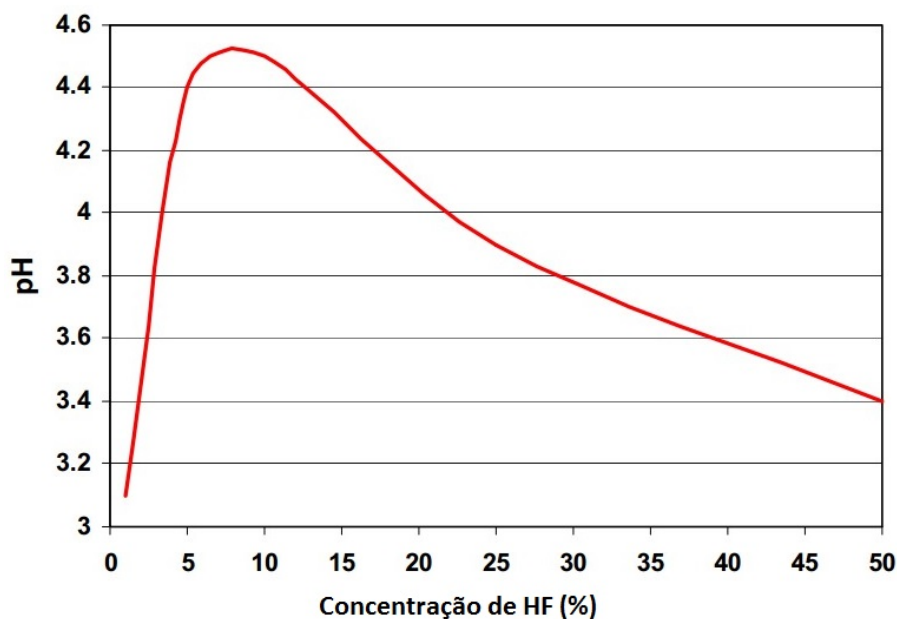


Fig. 2.51: Variação do pH do HF com a sua concentração [62]

Uma consequência da utilização de HF, é a formação de uma camada de hidrogénio na superfície da peça. O titânio possui uma grande afinidade pelo hidrogénio, sendo quase impossível evitar a formação da mesma durante o ataque químico. A captação de hidrogénio por parte do titânio, origina uma fragilização da peça que propicia o aparecimento de fendas e porosidades devido à natureza gasosa do hidrogénio, que levam à inutilização da mesma. Com banhos a altas temperaturas, a taxa de absorção de H pelo titânio aumenta, sendo então necessário controlar a temperatura de modo a evitar a formação desta camada frágil. Para além da temperatura do banho, o tempo de exposição da peça ao ataque químico deve ser controlado. Também o aumento da percentagem de ácido nítrico, por se tratar de um ácido oxidante, reduz o perigo de contaminação por hidrogénio [60; 61].

Outras soluções ou ácidos são utilizados para o ataque químico de peças de titânio. Nomeadamente alternativas ao ácido fluorídrico devido aos custos e perigos associados. Os ácidos em questão são os seguintes [60; 61; 63]:

- **Ácido fluobórico ( $\text{HBF}_4$ )** - com taxas de remoção de material de aproximadamente 80% das apresentadas pelo HF, trata-se de um ácido que quando em contato com o titânio não forma a camada frágil de hidrogénio. Soluções contendo 5% ou maior percentagem deste ácido são capazes de um ataque uniforme às peças de titânio. Para temperaturas de banho entre 65 °C e 90 °C o ácido fluobórico é eficaz na remoção de metal. Relativamente aos cuidados a ter aquando do manuseio deste ácido, este é menos perigoso do que o HF. No entanto, é um ácido corrosivo, tóxico quando inalado e quando em contato com a pele e olhos pode causar queimaduras severas [64];
- **Fluoreto de sódio ( $\text{NaF}$ ) e Persulfato de amónio ( $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ )** - têm a capacidade de ser uma alternativa ao HF. Soluções constituídas por 0,5 M de cada um destes componentes, em banhos com temperaturas entre os 77 °C e os 100 °C são capazes de oferecer uma boa taxa de remoção de material;

- **Sulfato de cobre ( $\text{CuSO}_4$ ) e Hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ )** - Com um solução constituída por 10% de  $\text{CuSO}_4$ , 50% de  $\text{NaOH}$  e 40% de água e a uma temperatura de pelo menos  $105^\circ\text{C}$  é possível conseguir uma taxa de remoção de cerca de 30% da taxa apresentada pelo HF.

### 2.5.1.2 Taxa de remoção de material

A taxa de remoção de material é um dos aspetos mais importantes do processo de maquinagem química, quanto maior for, menor é o tempo necessário que a peça deve estar no banho. Esta depende de vários fatores, entre os quais [61]:

- Concentração do ácido, quanto maior mais forte será o ataque químico à peça;
- Temperatura do banho;
- Quantidade de metal dissolvido na solução, à medida que se vão realizando operações de maquinagem química, a quantidade de titânio no banho vai aumentando o que prejudica a taxa de remoção de metal. Para combater este problema devem ser feitas adições periódicas dos ácidos usados [60].

Labak [61] realizou um comparativo entre as soluções referidas anteriormente, de modo a conhecer as taxas de remoção de cada uma. Para isso recorreu a provetes da liga Ti-6Al-4V expondo-os a banhos das várias soluções durante 3 minutos, retirando as peças e colocando-as em água durante 10 segundos, voltando a colocá-las 3 minutos no banho, obtendo o gráfico exposto na Figura 2.52.

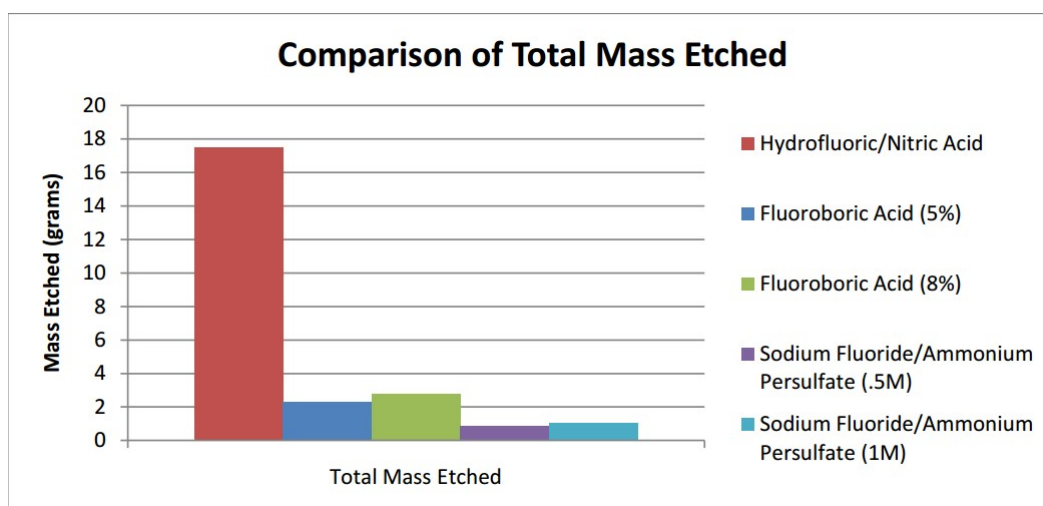


Fig. 2.52: Total de massa removida por cada uma das soluções utilizadas no estudo [61]

A maior remoção apresentada pela solução combinada de ácido fluorídrico com nítrico já era esperada. Contudo a sua grande superioridade relativamente às outras soluções, o autor refere que se deve ao fato de estas não terem atingido o seu poder removedor, ou seja para atingir os níveis de remoção necessitam de maior tempo de ataque [61].

Para além disto, o autor efetuou um estudo comparativo económico entre cada uma das soluções para o volume de 23.000 litros (Tabela 2.14).

Tabela 2.14: Custo de 23.000 litros de cada solução [61]

Soluções	Preço (€)
HF + HNO <sub>3</sub>	53.500
HF <sub>4</sub> (5%)	17.800
HF <sub>4</sub> (8%)	28.500
NaF + (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>8</sub> (0.5 M)	112.000
NaF + (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>8</sub> (1 M)	225.000

### 2.5.1.3 Eficiência do banho e reciclagem dos ácidos

Como se afirmou anteriormente no capítulo 2.5.1 o processo de maquinagem química é pouco eficiente. Deste modo Knox [63] revela ter sido feito um estudo na empresa *Wyman Gordon* de modo a avaliar a eficiência do seu processo de maquinagem química. Para isso realizaram-se testes à solução HF + HNO<sub>3</sub> com provetes de Ti-6Al-4V de modo estudar a temperatura do banho, agitação, concentração de titânio no banho e concentração de HF na taxa de remoção. Chegando à conclusão que automatizando o processo se consegue atingir condições ótimas, usando HF com uma concentração de 8%, temperaturas de banho entre 30 e 50 °C de modo a garantir uma remoção eficaz de metal.

Relativamente à poluição gerada pelo processo, pode-se afirmar que se trata de um processo muito poluente. O principal motivo deste flagelo é a curta duração de "vida" de um banho. Devido à falta de métodos de recuperação dos ácidos e as perdas por evaporação, o banho tem de ser renovado em curto espaço de tempo acarretando custos elevados. Knox [63] estima que 80% dos constituintes dos banhos sejam desperdiçados. Posto isto realizaram um estudo de modo a averiguar quais as melhores formas de diminuir o desperdício de ácido e a contribuição de dejetos perigosos por parte da empresa para os aterros. Esse objetivo só é conseguido caso se elimine a evaporação de ácidos e também caso se recorra a um equipamento que elimine o titânio do banho.

#### Prevenção da ocorrência de evaporação

Knox [63] refere que o tanque de maquinagem química da *Wyman Gordon* é renovado a cada duas semanas, sendo que 14% do banho é perdido por evaporação. De modo a prevenir esta ocorrência, recorreram a bolas flutuantes (Figura 2.53), tendo estas apresentado um decréscimo de 49,3% nas perdas por evaporação.



Fig. 2.53: Bolas flutuantes que reduzem taxa de evaporação [65]

Este tipo de bolas flutuantes produzidas pela AWTT são de alta performance, possuindo as seguintes propriedades [66]:

- Simples e rápidas de instalar;
- Cada bola é feita de polietileno altamente denso de longa duração;
- Resistentes aos raios UV;
- Reduzem as perdas por evaporação até 90%;
- Permitem a colocação de equipamentos no banho;
- Solução rápida e eficaz contra problemas de odor.

Outras opções como a concepção de uma capa para o tanque ou a otimização dos ciclos de aquecimento e arrefecimento podem ser eficazes contra a evaporação. Com estas melhorias é possível diminuir o desperdício de ácido e assim diminuir a compra de matéria prima reduzindo desse modo os custos associados ao processo.

### Reciclagem dos ácidos usados

Cada vez que o banho é renovado, a solução retirada do tanque é desperdiçada. Esta ação prejudica tanto o ambiente como aumenta os custos derivados da necessidade permanente de compra de matéria prima. Assim sendo, a existência de um equipamento que recupere o ácido após atingir a saturação é vista como uma enorme mais valia. Em 1993 a companhia *Wyman Gordon* eliminou um total de 625.000 litros de ácido, perfazendo um total de 110.000 euros em ácido desperdiçado. De modo a travar o desperdício de dinheiro, analisaram dois tipos de sistemas, ambos com o potencial de recuperar 95% do total de ácidos eliminado pela empresa [63]. Esses sistemas são:

- **“Acid Recycling System”** - desenvolvido pela *Pure Cycle Environmental Technologies*, trata-se de equipamento que realiza um processo de diálise por difusão, como se pode observar na Figura 2.54.

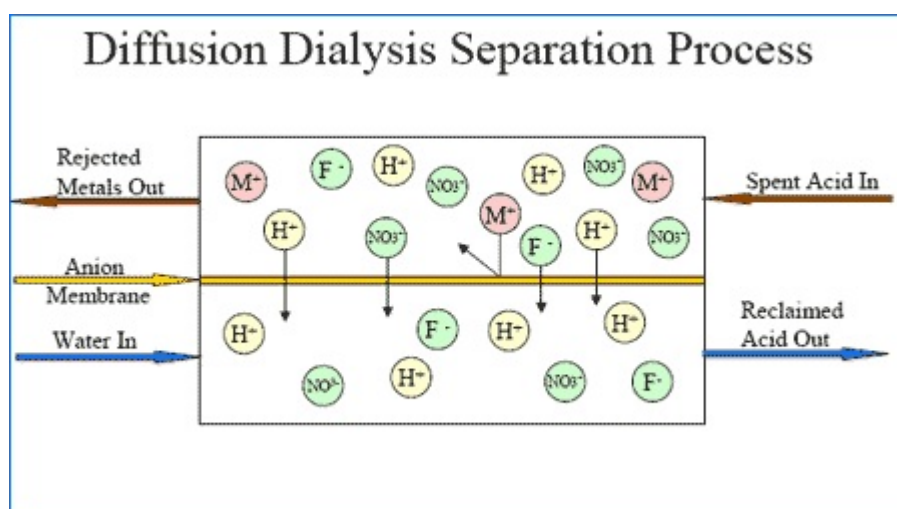


Fig. 2.54: Processo de diálise por difusão para a reciclagem de ácidos [67]

Este sistema possui uma membrana permutadora aniónica que atua como uma barreira semi-permeável, posicionada entre uma corrente de água e ácido a fluir com



metal dissolvido. A maioria do ácido migra através da membrana para a água deixando os resíduos para trás. O ácido depois de purificado segue para o tanque, enquanto que os contaminantes serão posteriormente alvo de tratamento. Ácido fresco deve ser adicionado na quantidade não recuperada de modo a manter a concentração desejada. Segundo o fabricante, este equipamento possui uma eficiência de 91.5% [67; 68].

Knox [63], após uma análise económica completa, revela que este equipamento poderia criar uma poupança anual de 170.000 euros.

A empresa *Mech-Chem* possui um equipamento com o mesmo tipo de método de purificação de ácidos saturados, nas Figuras 2.55 e 2.56 encontra-se o aspeto e um esquema de funcionamento do mesmo.



Fig. 2.55: Equipamento de diálise por difusão para a reciclagem de ácidos [69]

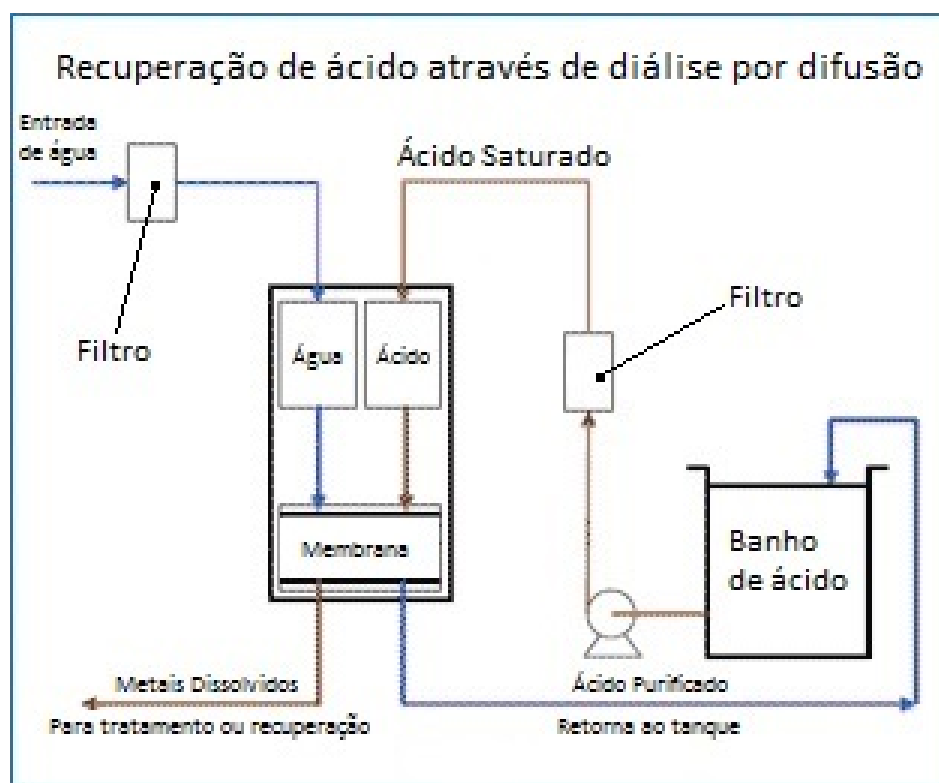
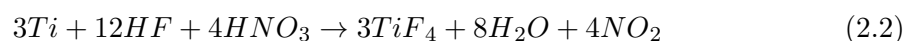


Fig. 2.56: Esquema de funcionamento de equipamento de diálise por difusão para a reciclagem de ácidos [70]

- **“Waste Acid Detoxification and Recovery System”** - desenvolvido pela *Pacific Northwest Laboratory*, consiste numa unidade de destilação sob vácuo. O ácido saturado entra no sistema, sendo concentrado até que temperatura de ebulição atinge uma temperatura constante com uma solução ácida adequadamente desidratada. Nessa altura o ácido depois de purificado volta ao tanque de maquinagem. O sistema é colocado sob vácuo de modo a baixar a temperatura de ebulição do ácido a ser reciclado. Com isto aumenta-se o tempo de vida do equipamento e reduzem-se custos de energia [71].

## 2.5.2 Maquinagem química de ligas de titânio

Tal como foi abordado no capítulo 2.5.1.1, a solução comumente utilizada para o ataque a peças de ligas à base de titânio consiste na combinação de ácido fluorídrico com ácido nítrico. Esta combinação deve-se ao fato de o HF ser um ácido forte que promove uma taxa de remoção elevada, enquanto que o ácido nítrico se trata de um ácido oxidante que tem como objetivo limitar a reação entre o titânio e o ácido fluorídrico, para minimizar a probabilidade de ocorrência da formação da camada de hidrogénio. A equação seguinte traduz a reação entre esta solução e as ligas de titânio [72].



Say *et al.* [72] efetuaram um estudo com o objetivo de caracterizar a solução HF + HNO<sub>3</sub> para provetes da liga Ti-6Al-4V. Para a composição do banho, adicionaram ácido fluorídrico e nítrico com 55% e 70% de concentração e água destilada. Os provetes foram



mergulhados no banho durante 60 minutos, em várias soluções com diferentes percentagens de ambos os ácidos, com o intuito de comparar taxas de remoção, absorção de hidrogénio e profundidade de ataque. Na Figura 2.57 é possível constatar que a solução que obteve maior taxa de remoção foi a solução 5% HF + 10% HNO<sub>3</sub>.

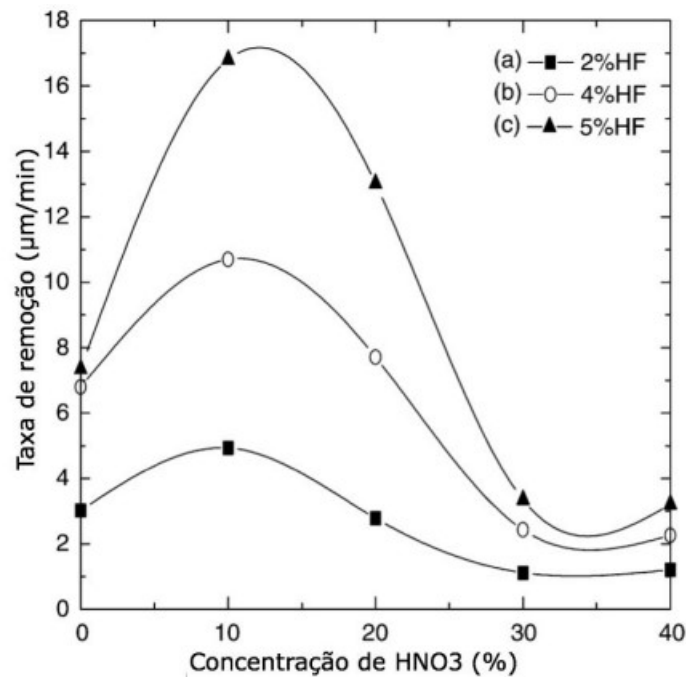


Fig. 2.57: Taxa de remoção em função da percentagem de HF e HNO<sub>3</sub> [72]

Contudo, na Figura 2.58 observa-se que a solução que obteve níveis mínimos de absorção de hidrogénio foi a 2% HF + 30% HNO<sub>3</sub>, corroborando o que foi referido no capítulo 2.5.1.1 que quanto maior a percentagem de ácido nítrico menor será a absorção de H.

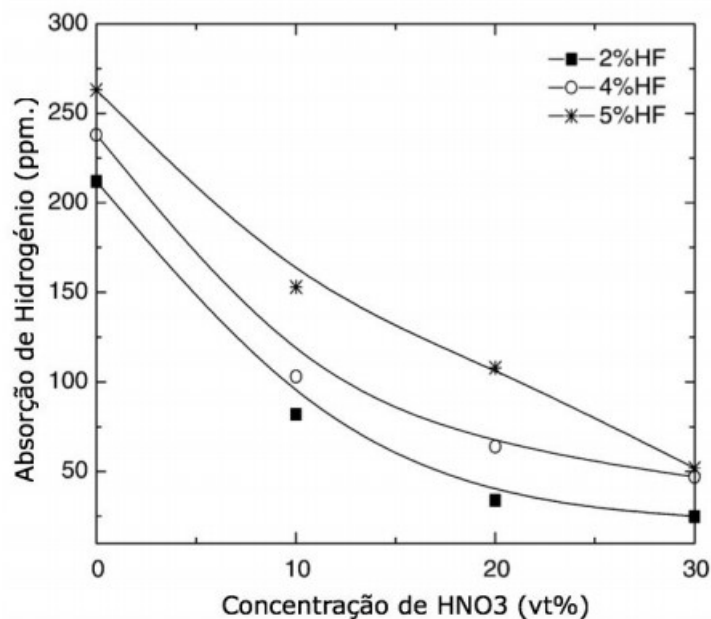


Fig. 2.58: Absorção de hidrogénio em função da percentagem de HF e HNO<sub>3</sub> [72]

Deste modo, para obter uma solução ideal é necessário alcançar um equilíbrio entre

obter uma taxa de remoção elevada e uma baixa absorção de hidrogénio.

Relativamente à solução que obteve uma maior profundidade de ataque, de acordo com Say *et al.* [72] trata-se da solução 5% HF + 10% HNO<sub>3</sub>.

Um dos fatores importantes do processo de maquinagem química, expostos no capítulo 2.5.1.1 relaciona-se com a rugosidade apresentada pelas peças após ataque químico. Spear *et al.* [56] refere que a rugosidade apresentada no final do processo depende dos seguintes aspetos:

- Taxa de remoção de material;
- Superfície da peça antes do processo;
- Tamanho e morfologia de grão do material;
- Realização de algum tratamento térmico;
- Composição química da liga.

De modo a estudar este fator, Mutombo *et al.* [73] realizaram testes de maquinagem química em provetes da liga Ti-6Al-4V com soluções com diferentes percentagens HF com a percentagem de HNO<sub>3</sub> a permanecer igual. A solução que apresentou melhores acabamentos superficiais foi a de 4% HF + 20% HNO<sub>3</sub>, como se verifica na Figura 3.5. No entanto, a solução que apresentou níveis mais baixos de contaminação por hidrogénio foi 3% HF + 20% HNO<sub>3</sub>, obtendo a taxa de remoção máxima para uma temperatura de banho de 65 °C e de duração de ataque de 40 min, como mostra a Figura 2.60.

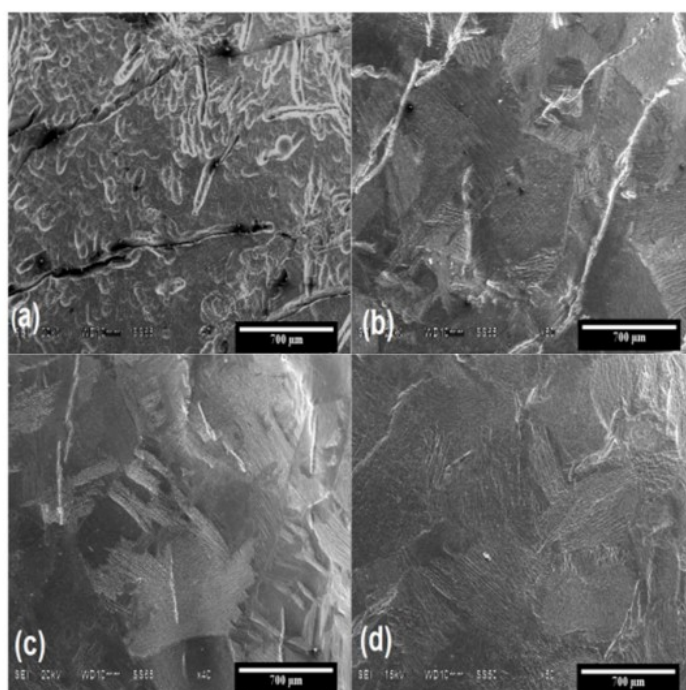


Fig. 2.59: Superfícies apresentadas após maquinagem química pelas soluções: (a) 1% Hf, (b) 2% HF, (c) 3% HF e (d) 4% HF [73]

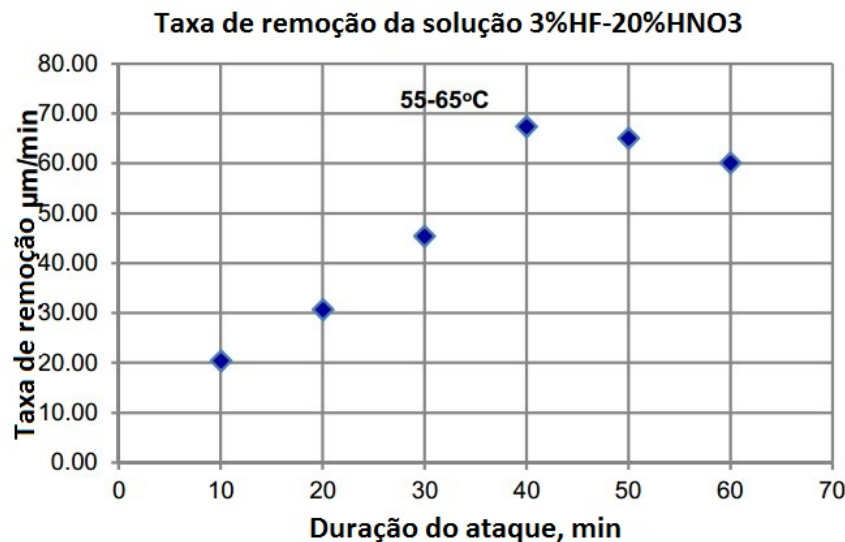


Fig. 2.60: Taxa de remoção da solução 3% HF + 20% HNO<sub>3</sub> em função do tempo de ataque [73]

### 2.5.3 Maquinagem química de ligas TiAl

No que diz respeito à ligas de TiAl, a documentação sobre maquinagem química deste tipo de ligas é escassa. As únicas referências sobre o ataque químico em aluminetos de titânio são abordadas por Chen [74] em que a solução testada possibilita a utilização em várias ligas de titânio com diferentes percentagens de Al, V e Nb e nas dissertações realizadas por Torres [33] e Pires [42], em que ambos realizaram testes em turbinas *near-net shape* de TiAl vazadas em carapaças com formulações de ítria e zircónia.

Chen [74] na sua patente, realizou testes a ligas como Ti-48Al-1V e Ti-45Al-5Nb-1W utilizando uma solução com os constituintes detalhados na Tabela 2.15, a uma temperatura de serviço de cerca de 52°C.

Tabela 2.15: Constituintes do banho utilizado por Chen para testes de maquinagem química em ligas TiAl [74]

Constituinte	Percentagem mássica (%)
Ácido Fluorídrico (HF)	2
Ácido Sulfúrico (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	4
Cloreto de Sódio (NaCl)	3.5
Água (H <sub>2</sub> O)	90.5

Segundo o autor, esta solução agrega HF, por se tratar do elemento responsável pelo ataque químico, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> para obter bons acabamentos superficiais e NaCl, que previne a contaminação de hidrogénio. Esta solução permite alcançar uma taxa de remoção de 0,15 mm por hora e superfícies sem contaminação por hidrogénio [74]. De modo a promover uma taxa de remoção alta devem ser feitas adições periódicas de HF e também haver agitação permanente de modo a promover uma remoção uniforme de metal.

Contudo, Torres [33] e Pires [42] nas suas dissertações, testaram esta solução em turbinas em TiAl, para a mesma temperatura de serviço de Chen [74], apresentando taxas de remoção bastante baixas e superfícies bastante rugosas e ásperas, descartando a utilização desta solução.

Torres [33] e Pires [42], testaram outra solução, apresentada na Tabela 2.16.

Tabela 2.16: Constituintes da solução utilizada por Torres e Pires para testes de maquinagem química em turbinas de TiAl [33; 42]

Constituinte	Percentagem mássica (%)
Ácido Fluorídrico (HF)	4.5
Ácido Nítrico (HNO <sub>3</sub> )	7.5
Erkantol	5
Água (H <sub>2</sub> O)	83

A utilização de *Erkantol*, por se tratar de um agente molhante, tem o intuito de promover uma maior uniformidade de ataque da solução.

Esta solução foi testada de forma rudimentar, sendo utilizada uma tina de plástico para colocar a solução, sendo esta tina posicionada num recipiente de plástico com água aquecida por duas resistências elétricas (Figura 2.61). A temperatura do banho foi de 50 °C, tendo a duração dos testes variado até atingir a taxa de remoção desejada. Para isso, foram utilizadas turbinas de teste para os primeiros ensaios de validação e posteriormente turbinas *near-net shape*, todas obtidas em carapaças de diferentes formulações, zircão e ítria respetivamente [33; 42].



Fig. 2.61: Sistema utilizado para a realização dos testes de maquinagem química [33]

O objetivo dos ensaios foi remover a camada alpha case e retirar 0,4 mm na ponta das alhetas das turbinas. Desse modo, realizaram-se ensaios de modo a testar a capacidade de remoção da solução, obtendo-se uma taxa de remoção média entre 0.010-0.014 mm/min, alcançando a remoção desejada em 30 minutos de ataque [33; 42].

Aquando do ataque em turbinas *near-net shape*, a duração deste variou entre os 30 e 40 minutos, obtendo os resultados expostos na Figura 2.62, em que as turbinas 1, 2 e 3 eram relativas a facecoat de zircão enquanto que a quarta é referente a facecoat de ítria [33; 42].

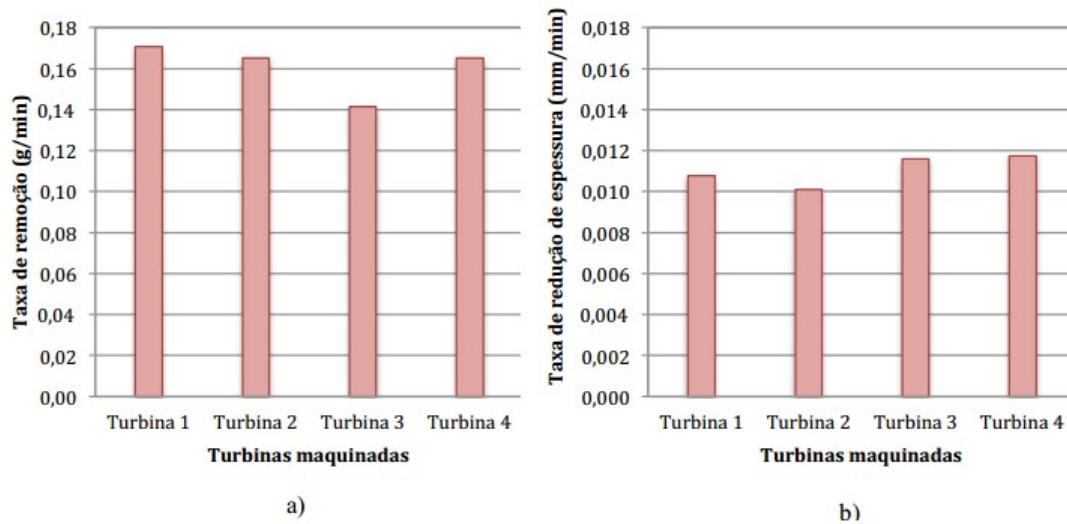


Fig. 2.62: Resultados obtidos para turbinas *near-net shape*, a) Taxas de remoção obtidas, b) Taxas de redução de espessura obtidas [33]

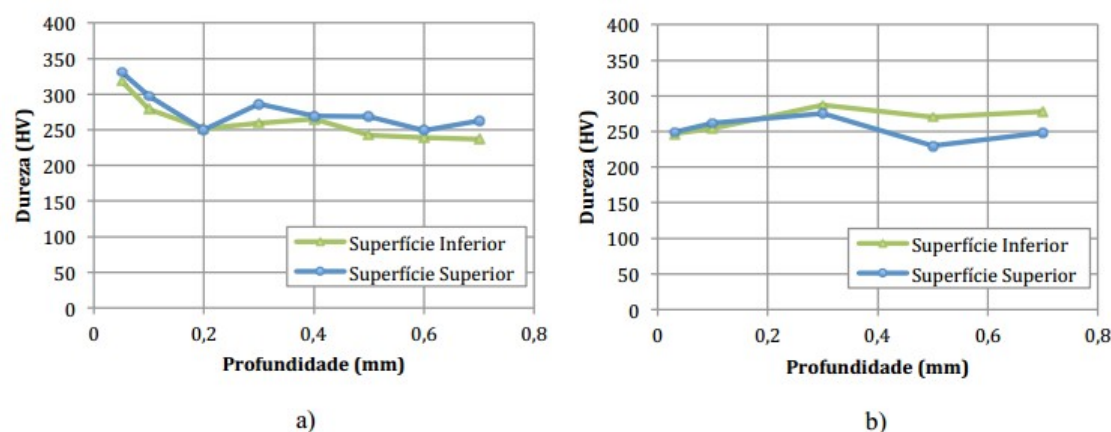
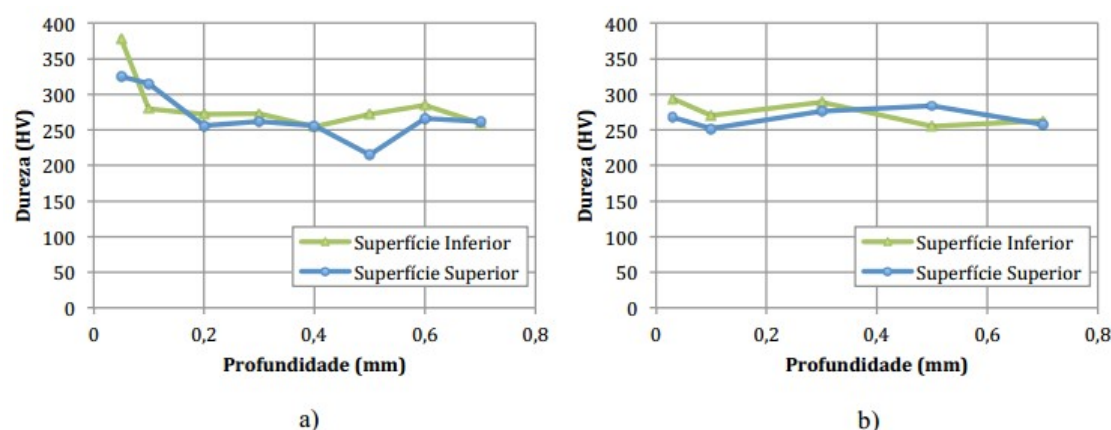
Posto isto, a duração de imersão que obteve a taxa de remoção desejada foi a de 40 minutos.

Apesar de estes testes terem alcançado a remoção de 0,4 mm, também apresentaram um fator negativo que teve origem na falta de agitação do banho que originou uma remoção heterogênea do metal e também a pouca ou nenhuma remoção sofrida pela parte inferior da turbina (Figura 2.63), devido ao posicionamento vertical da mesma no cesto, o que impediu a circulação da solução nessa zona [33; 42].



Fig. 2.63: Aspeto da parte inferior da turbina provocado pelo posicionamento da mesma e pela falta de agitação do banho [33]

Relativamente à remoção da camada endurecida da turbina de TiAl, esse objetivo foi alcançado para as turbinas revestidas com ambas as formulações, como demonstram as Figuras 2.64 e 2.65, em que se realizaram medições nas superfícies superior e inferior da alheta medida.



## 2.5.4 Maquinagem química de ligas de alumínio

Devido ao alumínio ser um metal vastamente utilizado e também devido à sua grande utilização no mercado automóvel e aeroespacial, achou-se pertinente abordar o tema de maquinagem química de ligas de alumínio. O alumínio é um metal com vasta aplicação em indústrias onde o peso é o fator mais relevante. Assim sendo, tal como o titânio é passível de ser maquinado quimicamente de modo a reduzir o baixo peso de estruturas e ou remover metal de peças com geometrias complexas que a maquinagem convencional não consegue alcançar [75].

Para realizar o processo de maquinagem química, a escolha dos químicos que integrarão o banho é a tarefa chave do processo, pois um banho eficaz levará a altas taxas de remoção e acabamentos suaves. No caso do alumínio, como se verifica na Figura 2.50, conclui-se que o hidróxido de sódio (NaOH) é o mais utilizado para o ataque químico às ligas descritas. No entanto, Çakır [75] realizou testes de maquinagem química utilizando provetes da liga EN AW-7075 recorrendo a Cloreto de Ferro ( $\text{FeCl}_3$ ) com 1.25 M de concentração, de modo a se entender até que ponto é vantajoso a utilização deste químico no processo. Para isso, efetuou os testes em banhos com temperaturas a variar entre os 20 e 50 °C, durante 20

min, obtendo os seguintes resultados expostos nas Figuras 2.66 e 2.67.

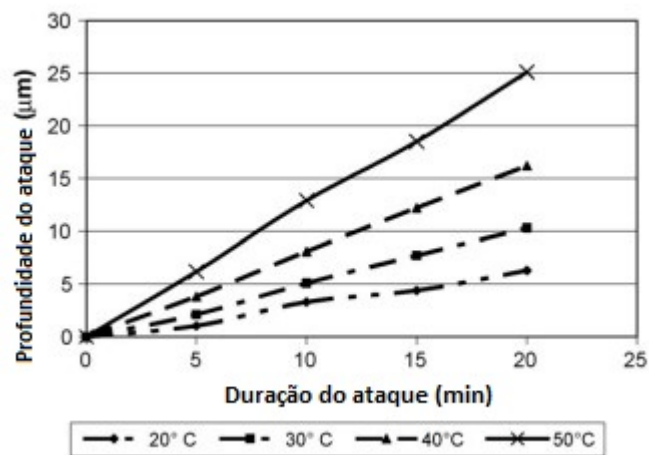


Fig. 2.66: Profundidade de remoção em função da temperatura do banho [75]

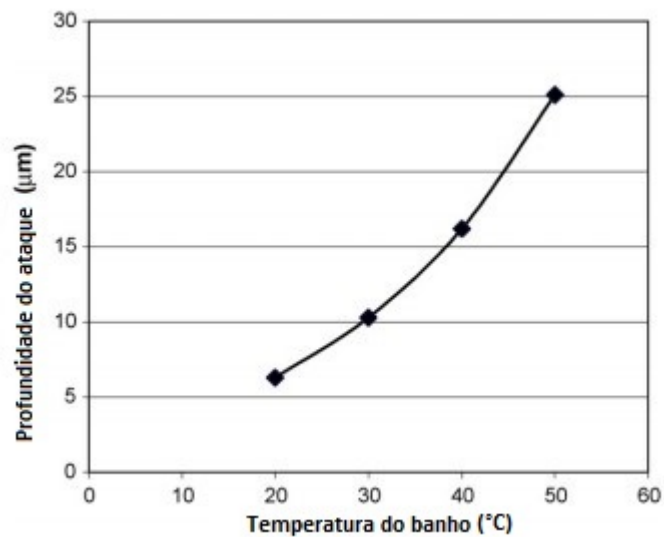


Fig. 2.67: Profundidade de remoção em função da duração do ataque químico [75]

Posto isto, pode-se concluir que para a obtenção de uma elevada profundidade de remoção deve-se caminhar para maiores temperaturas de banho e maior duração de ataque.

Relativamente à rugosidade obtida após os vários testes, esta é inversamente proporcional ao aumento da duração do ataque e diretamente proporcional ao aumento da temperatura do banho [75] como demonstram as Figuras 2.68 e 2.69.



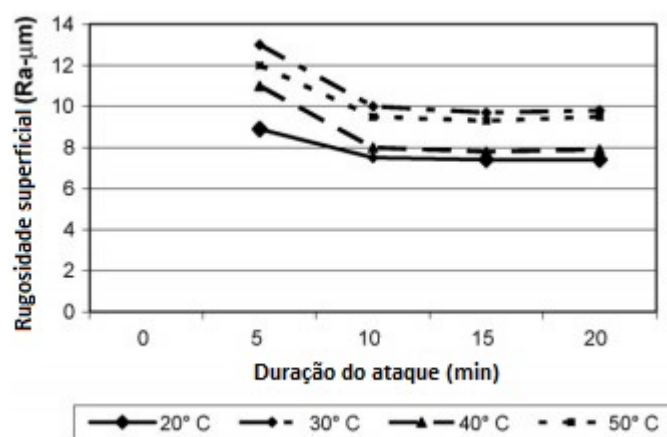


Fig. 2.68: Rugosidade da superfície em função da duração do ataque químico [75]

No que concerne, à duração do ataque químico, o que apresentou menor nível de rugosidade foi após 20 minutos de maquinagem. Podendo se afirmar que quanto maior a duração do ataque menor a rugosidade da peça.

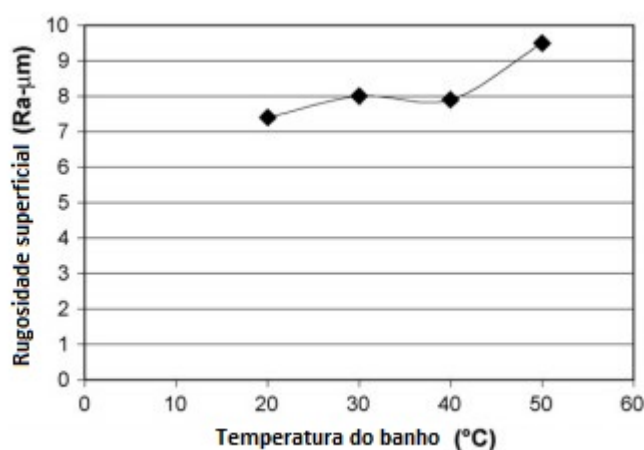


Fig. 2.69: Profundidade de remoção em função da temperatura do banho [75]

A menor rugosidade obtida nos testes foi obtida num banho com 20 °C de temperatura, enquanto que o maior valor de rugosidade foi obtido para 50 °C.

### 2.5.5 Defeitos associados ao processo de maquinagem química

O processo de maquinagem química, tal como todos, é sujeito à ocorrência de defeitos nos produtos finais. De seguida são apresentados os defeitos passíveis de aparecer causadas por este processo [59].

- **Canal** - formação de um canal ou ranhura na base do raio do *fillet*. Defeito aceite caso seja corrigido mecanicamente (Figura 2.70);



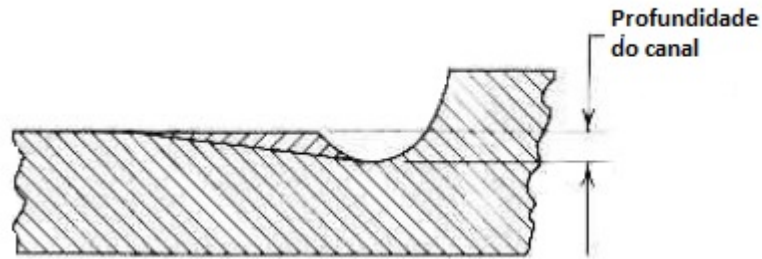


Fig. 2.70: Defeito por aparecimento de canal [59]

- **Canalização por gás** - ranhuras verticais ou canais na superfície atacada, resultantes devido a bolhas de gás que se eleva até à superfície. Defeito aceite caso seja corrigido mecanicamente, mantendo as dimensões dentro das tolerâncias exigidas (Figura 2.71);

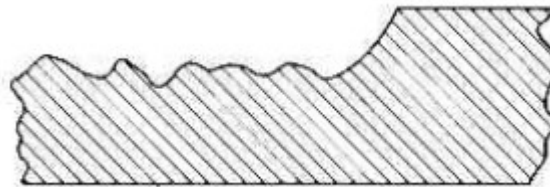


Fig. 2.71: Defeito por aparecimento de canal devido a bolhas de gás [59]

- **Crateras** - depressões localizadas na superfície atacada (Figura 2.72);

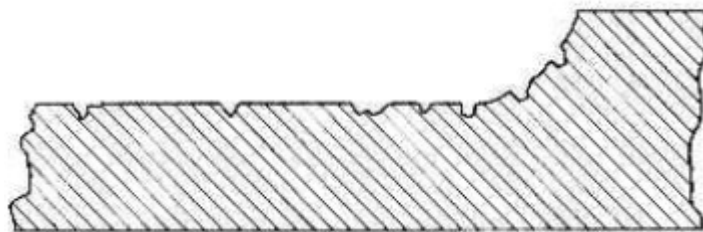


Fig. 2.72: Defeito por aparecimento de crateras na superfície da peça [59]

- **Saliência** - Presença de saliência de metal na extremidade superior do raio do *fillet* (Figura 2.73);

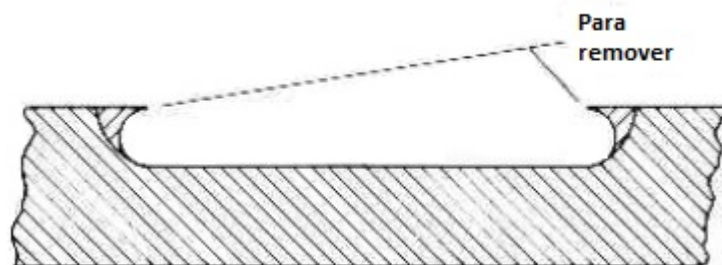


Fig. 2.73: Defeito por aparecimento de saliência nos *fillets* [59]

- **"Ilhas"**- áreas locais levantadas que resultam do mascaramento ou outro material deixado na superfície, evitando o ataque (Figura 2.74);

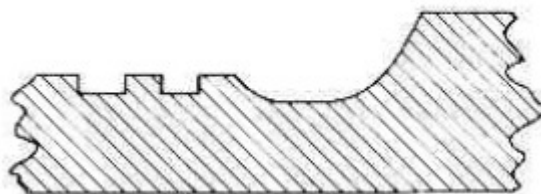


Fig. 2.74: Defeito por aparecimento de "ilhas" na superfície da peça [59]

- **Entalhe** - entalhes na base do raio do *fillet*, resultante de um ataque muito profundo no interior do metal (Figura 2.75).

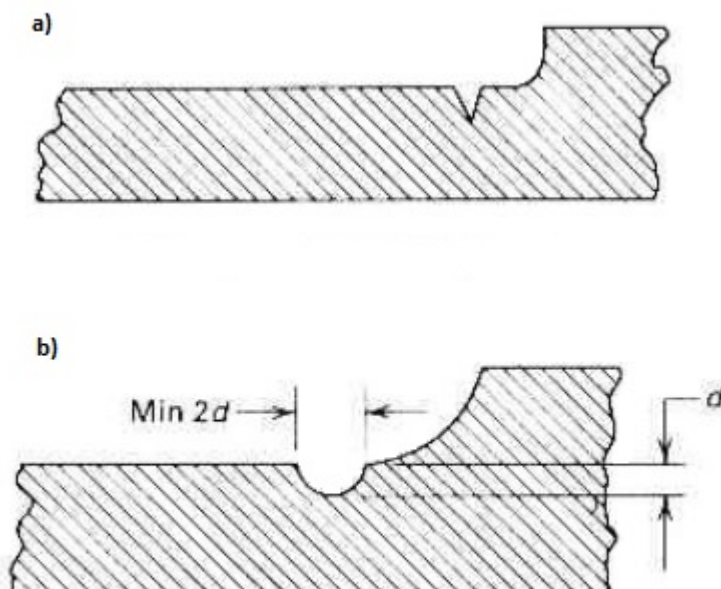


Fig. 2.75: Defeito por formação de entalhe na superfície da peça, a) entalhe não aceite, b) entalhe aceitável [59]

## 2.5.6 Ensaios para apuração dos resultados após maquinagem química

Após maquinagem química é necessário submeter os provetes testados a vários ensaios não destrutivos com o intuito de verificar os resultados alcançados. Tais ensaios incluem medições de rugosidade, microdurezas e de controlo dimensional, mais concretamente levantamento de forma.

### 2.5.6.1 Medições de rugosidade

A medição de rugosidade consiste na digitalização de uma superfície através de um equipamento de medição por contato. O instrumento de medição analisa a superfície através de uma ponta de contato (*stylus tip*), denominada por rugosímetro. Este equipamento determina os desvios na forma do perfil de superfície gerado e calcula os parâmetros de rugosidade definidos pela norma ISO 4287 [76]. Os parâmetros que se obtêm após medição de rugosidade são os seguintes:

- **Ra** - Desvio médio aritmético do perfil;
- **Rq** - Desvio médio quadrático do perfil;
- **Rp** - Altura máxima de pico do perfil;
- **Ra** - Altura máxima do perfil;

Na Figura 2.76 apresenta-se um exemplo de medição de rugosidade, onde se observa o rugosímetro referido.



Fig. 2.76: Exemplo de medição de rugosidade [77]

Relativamente às tolerâncias de rugosidade que as turbinas têm que respeitar, estas encontram-se presentes na Figura 2.77.

		CLA [μinch]	$R_a^{\text{II}}$ [μm]	$R_z^{\text{II}}$ [μm]	$R_t^{\text{II}}$ [μm]
Machining	N 1	1	0.025	0.22–0.30	0.24–0.40
	N 2	2	0.050	0.15–0.60	0.49–0.90
	N 3	4	0.1	0.8–1.1	0.85–1.45
	N 4	8	0.2	1.0–1.8	1.10–2.40
	N 5	16	0.4	1.6–2.8	1.75–3.60
	N 6	32	0.8	3.0–4.8	3.2–6.0
Investment casting	N 7	63	1.6	5.9–8.0	6.3–10.0
	N 8	125	3.2	12–16	13.0–19.5
	N 9	250	6.3	23–32	25–38
Sand casting	N 10	500	12.5	46–57	48–68
	N 11	1000	25	90–110	95–130
	N 12	2000	50	180–220	190–250

Fig. 2.77: Valores de rugosidade que as peças em *investment casting* têm de apresentar [78]

### 2.5.6.2 Medição de microdurezas

O recurso a ensaios de dureza é interessante para a presente dissertação de forma a quantificar a formação da camada endurecida, relatada em 2.4.1 e se esta foi removida após maquinagem química. Através da Figura 2.78 é possível constatar a evolução da microdureza de um metal com a extensão do  $\alpha$  – case, sendo a sua extensão (pode ir dos 80 aos 500  $\mu m$  dependendo da liga de titânio e também do tipo de formulação cerâmica utilizada para a camada de facecoat) considerada até a dureza estabilizar no valor do núcleo [29].

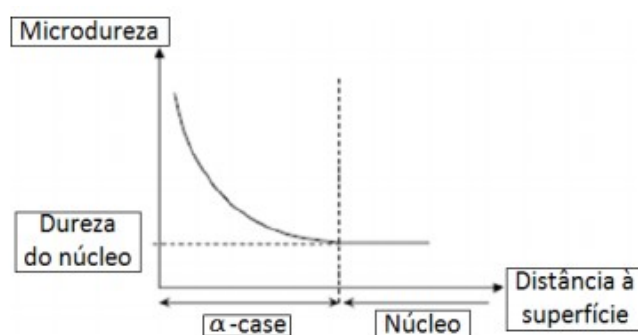


Fig. 2.78: Microdureza em função da distância à superfície da peça [79]

Para realizar tal verificação, recorreu-se ao ensaio *Vickers*, o mais utilizado para medições de microdurezas em peças de elevada precisão, pois usa cargas baixas (0,01 a 0,1 kgf) e deixa um entalhe mais pequeno relativamente ao ensaio *Brinell*, o que permite a realização de diversas medições em distâncias mais curtas. Na Figura 2.79 demonstra-se o princípio do método de *Vickers* [80].

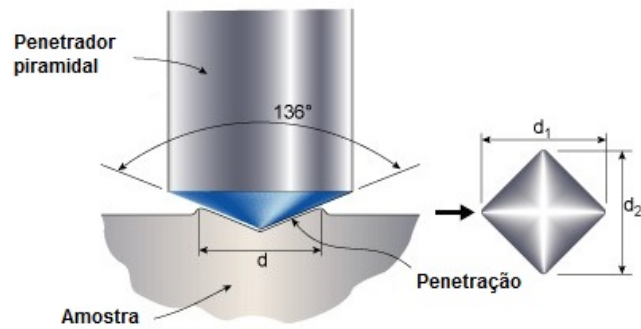


Fig. 2.79: Teste de dureza *Vickers* [80]

### 2.5.6.3 Controlo dimensional

O controlo dimensional das peças antes e após maquinagem química é feito com medição dos pontos chave com recurso a um paquímetro e também através de Engenharia Inversa, mais concretamente por levantamento de forma. Esta tecnologia possui uma câmara que digitaliza a superfície da peça desejada, através do reconhecimento de vários pontos colados na mesma, originando um ficheiro .STL do elemento analisado. O processo de levantamento de forma é realizado através da deteção de três pontos (alvos) por parte da câmara, interpolando a superfície da peça entre esses três pontos. De seguida, é localizado um outro ponto, sendo feita uma interpolação entre esse e os três alvos anteriormente interpolados. Esta tarefa é repetida até se obter a forma da peça. Ao longo do reconhecimento dos alvos é gerado um modelo 3D da peça submetida num computador ligado à câmara. Com este modelo 3D é possível fazer sobreposições da peça com a mesma peça após maquinagem química, de modo a averiguar se a remoção foi homogênea ou também realizar uma comparação entre o CAD da pá de turbina e a pá gerada após injeção de cera, para se verificarem os desvios entre os dois modelos. O computador calcula os desvios entre ambas as peças e coloca-os nas zonas desejadas, apresentando-os numa escala colorida [79]. Na Figura 2.80 apresenta-se um exemplo de sobreposição de duas geometrias com os desvios incluídos e com a a respetiva escala colorida.

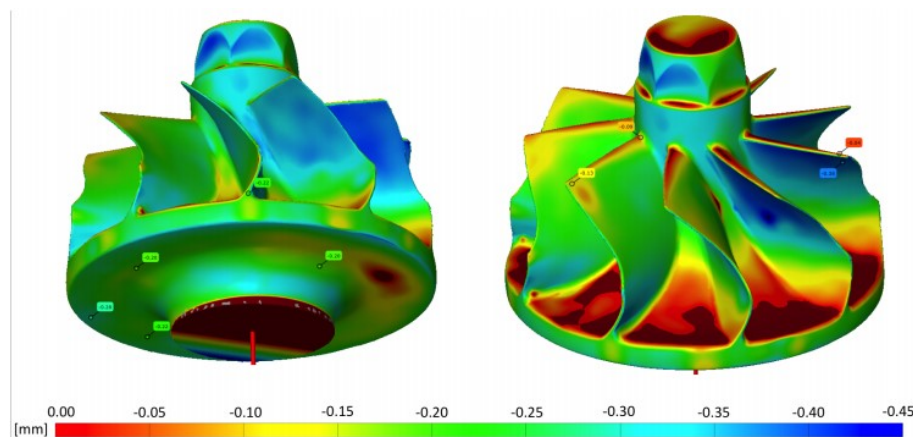


Fig. 2.80: Exemplo de sobreposição de turbina antes e após maquinagem química [42]

#### 2.5.6.4 Microscópio Eletrônico de varrimento

O microscópio eletrônico de varrimento (MEV) ou *Scanning Electronic Microscope* (SEM) é vastamente utilizado em diversas indústrias e laboratórios com o intuito de analisar a microestrutura e química de materiais orgânicos e inorgânicos. Este é principalmente constituído pelos seguintes componentes [81]:

- Fonte de eletrões;
- Coluna com lentes eletromagnéticas em que os eletrões viajam;
- Detetor de eletrões;
- Câmara para posicionar a amostra;
- Computador e monitor para verificar as imagens.

Os eletrões, produzidos num canhão de eletrões, são acelerados, viajando depois entre uma série de lentes e aberturas de modo a produzir um feixe focado que irá atingir a superfície da amostra. A amostra é colocada numa câmara, que posteriormente é sujeita a vácuo, dependendo o nível de vácuo do microscópio utilizados. A posição do feixe de eletrões sobre a amostra é controlada por bobines de digitalização posicionadas acima da superfície da amostra. Tais bobines permitem que o feixe seja digitalizado sobre a superfície da amostra. Este feixe de varrimento permite obter informações sobre uma certa área da amostra previamente definida. Como consequência da interação entre o feixe de eletrões e a amostra geram-se numerosos sinais, que serão posteriormente detetados [81]. Na Figura 2.81 apresenta-se um esquema que reflete o princípio de funcionamento do MEV.

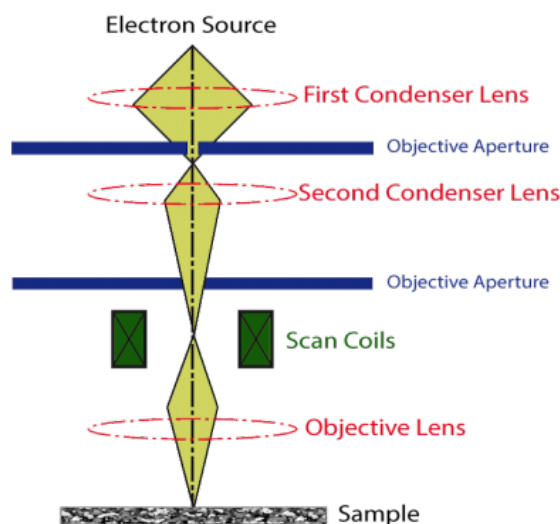


Fig. 2.81: Esquema com o princípio de funcionamento do microscópio eletrônico de varrimento [81]

#### 2.5.7 Variantes do processo de maquinagem química

Para além do processo de maquinagem química, existem outros processos com capacidade para remover material de modo a reduzir o peso, como é necessário na indústria



aeronáutica, aeroespacial e automóvel, ou com intuito de remover a camada reativa nas ligas à base de titânio, referida na capítulo 2.5.1. Os processos em causa tratam-se da:

- Maquinagem eletroquímica;
- Remoção de camada *alpha case* por laser;
- Remoção de camada *alpha case* por jato de água.

De seguida, será feita uma exposição sintética destes processos.

#### 2.5.7.1 Maquinagem eletroquímica

O processo de maquinagem eletroquímica consiste na remoção controlada de material por dissolução anódica numa célula eletrolítica na qual a peça a ser maquinada funciona como ânodo enquanto que a ferramenta de maquinagem representa o cátodo. O eletrólito é bombeado a alta velocidade (30-60 m/s), forçado por uma pressão entre 70 a 2800 kPa e a temperaturas entre os 24 e os 65 °C, para a folga entre o ânodo e o cátodo, enquanto que a corrente contínua (10-25 volts) é aplicada na célula, para dissolver o metal da peça de trabalho. Na Figura 2.82 encontra-se esquematizado o princípio de funcionamento deste processo [59; 82; 83].

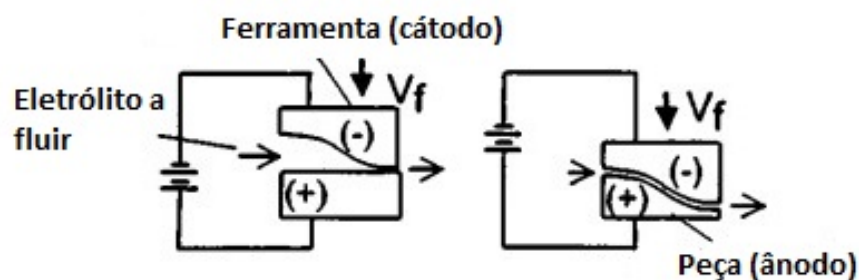


Fig. 2.82: Princípio de funcionamento do processo de maquinagem eletroquímica [82]

Este processo pode ser utilizado para uma extensa variedade de propósitos, incluindo alguns onde seria difícil, impossível ou muito demorada a utilização da maquinagem convencional. Tais propósitos abrangem a maquinagem de materiais de elevada dureza (como aço endurecido e ligas resistentes ao calor) e de geometrias complexas [59]. Relativamente à maquinagem convencional possui as seguintes vantagens [82]:

- Vasta aplicabilidade do processo independentemente da dureza do material;
- Ausência de desgaste da ferramenta;
- Elevada taxa de remoção de material;
- Produção de superfícies lisas e brilhantes;
- Produção de componentes de geometria complexa.

Tais vantagens levaram a que a MEQ fosse aplicada em diversas aplicações industriais, incluindo pás de turbina (Figura 2.83), caixas de rolamentos, engrenagens, moldes e matrizes e implantes médicos [83]. Sendo adequada à produção de grandes séries de forma a amortizar o elevado custo das ferramentas e de *setup*.

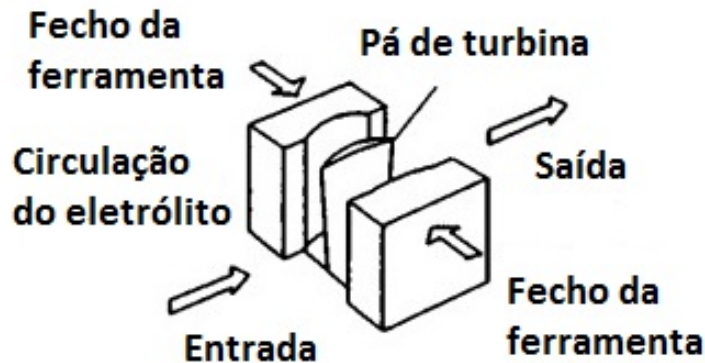


Fig. 2.83: Produção de pás de turbina através de maquinagem eletroquímica [82]

Tal como no processo de maquinagem química, a taxa de remoção é um fator essencial no processo de MEQ. Neste caso, a taxa de remoção é governada pela lei de Faraday sendo função da densidade de corrente. Por sua vez a densidade de corrente e por conseguinte a taxa de remoção dependem das seguintes variáveis [59]:

- Tensão;
- Taxa de penetração da ferramenta;
- Condutividade do eletrólito;
- Composição do eletrólito;
- Circulação do eletrólito;
- Material da peça a ser maquinada.

Na Tabela 2.17 apresentam-se taxas de remoção teóricas para diferentes metais, assim como o eletrólito utilizado para cada um.



Tabela 2.17: Taxas de remoção teóricas de cada metal e respetivo eletrólito utilizado [59]

Metal	Densidade (g/m <sup>3</sup> )	Taxa de Remoção		Eletrólito	
		Mássica (kg/h)	Volúmica (mm <sup>3</sup> /min)	Principal constituente	Concentração (máx) kg/l água
Alumínio	2.7	0.34	2100	NaNO <sub>3</sub>	0.6
				NaCl ou KCl	0.3
Cobre	9.0	2.37	4400	NaCl ou KCl	0.3
				NaNO <sub>3</sub>	0.6
Ferro	7.9	1.04	2300	NaCl ou KCl	0.3
				NaNO <sub>3</sub>	0.6
Molibedénio	10.2	1.19	2000	NaOH	0.18
Níquel	8.9	1.09	2100	NaCl ou KCl	0.3
				NaNO <sub>3</sub>	0.6
Titânio	4.5	0.59	2100	NaCl ou KCl	0.3
Tungsténio	19.3	1.14	1000	NaOH	0.18

Os eletrólitos, na MEQ, possuem três funções principais. Entre as quais, transportar a corrente entre a ferramenta e a peça, remover os produtos de reação da região de corte e remover o calor produzido durante a operação. Estes dividem-se em dois tipos, os de soluções salinas e os de soluções alcalinas. Os primeiros, entre eles o cloreto de sódio (NaCl), são utilizados principalmente por fornecerem uma maior condutividade à solução. Enquanto que as soluções de carácter alcalino, como o NaOH, são utilizadas em metais pesados (como molibedénio e tungsténio) e suas ligas [59].

Relativamente aos cátodos utilizados no processo de MEQ, os materiais mais utilizados no fabrico deste tipo de ferramenta são o cobre, latão, bronze, aço inoxidável e titânio. O bronze e o latão são bastante atrativos excepto quando é necessário uma rigidez superior. O titânio é utilizado especialmente quando se maquina com um eletrólito ácido, como o ácido sulfúrico, que o anodiza [59].

### 2.5.7.2 Remoção de camada *alpha case* por laser

A remoção da camada  $\alpha$ -case (100-300  $\mu\text{m}$ ), realizada geralmente por maquinagem química, é de extrema importância para a produção de componentes da indústria aeroespacial. No entanto, os químicos usados como o hidróxido de hidrogénio, são perigosos e prejudiciais para o ambiente. Para além deste processo erosivo, foram estudados outros como a granalhagem e jato de água, mas estes provaram ser pouco eficazes na remoção da camada endurecida, tendo em consideração a taxa de remoção, integridade superficial das peças e os custos das ferramentas associadas aos processos [84].

Foi então estudado por Yue *et al.* [84] um processo alternativo de remoção de  $\alpha$ -case de um provete da liga Ti-6Al-4V, com 60  $\mu\text{m}$  de espessura de  $\alpha$  case com 800 HV de dureza, recorrendo a um laser de luz pulsada.

Na Figura 2.84 demonstra-se como é utilizado o laser e também as superfícies do provete após a irradiação.

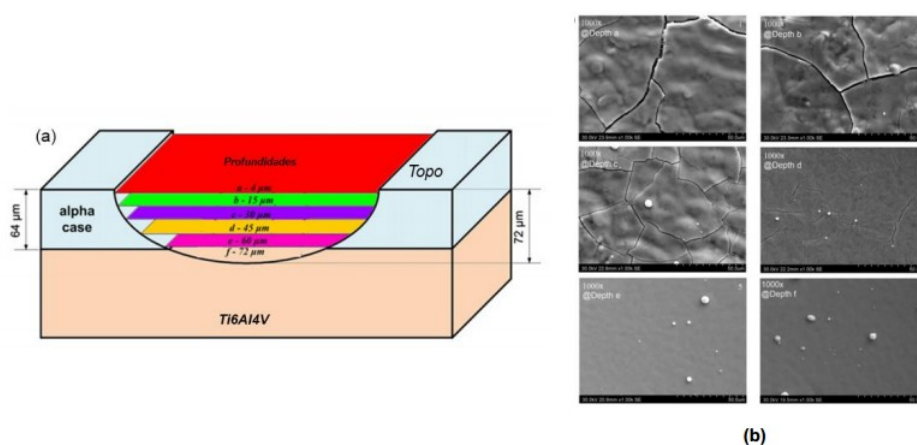


Fig. 2.84: (a) Esquema da secção transversal do provete após irradiação por laser, (b) Morfologia da superfície irradiada para profundidades de 4, 15, 30, 45, 60 e 72  $\mu\text{m}$  [84]

Seria interessante a realização de estudos idênticos para outras ligas de titânio com intuito de se perceber se este processo é passível de ser utilizado com os mesmos resultados nessas mesmas ligas.

### 2.5.7.3 Remoção de camada *alpha case* por jato de água

O processo de maquinagem por jato de água, é um método de maquinagem não convencional em ascensão, sendo apropriado para corte, maquinagem, limpeza, entre outros. Relativamente a processos convencionais de maquinagem, este apresenta as seguintes vantagens [85]:

- Não tem efeito térmico na peça;
- Amigo do ambiente;
- Versátil;
- Flexível.

Este processo pode ser dividido em dois tipos, jato de água abrasivo (AWJ) e jato de água sem abrasivo (PWJ). O primeiro utiliza um jato de água de alta pressão descarregado a partir de um orifício em combinação com finas partículas abrasivas que irão maquinar a peça alvo por erosão, enquanto que o segundo não utiliza qualquer tipo de abrasivos [85].

Em suma, o AWJ proporciona uma rápida remoção de material mas com isso gera-se contaminação do grão, enquanto que a utilização PWJ resulta numa superfície sem contaminação de grão, contudo a erosão é pouco eficiente. De modo a resolver este problema, foi desenvolvido um sistema híbrido inovador de jato de água (HWJC) com o objetivo de combinar as vantagens de ambos os processos. Neste processo, é aplicado primeiro na superfície AWJ de modo a eliminar uma profundidade de material parcial, seguindo-se a aplicação do PWJ. Este tem como propósito remover qualquer incrustação deixada pelo processo anterior e também realizar um polimento da superfície de modo a melhorar a sua topografia [85].

Huang *et al.* [85] testaram este método de modo a entender se seria capaz de remover a camada *alpha case*, com espessura de 650-750  $\mu\text{m}$ , em amostras de Ti-6Al-4V. Esse

objetivo foi alcançado com sucesso, contudo segundo Yue *et al.* este é pouco eficaz comparativamente com o método de remoção por laser. Na Figura 2.85 demonstra-se como se procede à remoção de tal camada e também uma microscopia obtida por SEM onde se observa a camada endurecida e a respetiva profundidade.

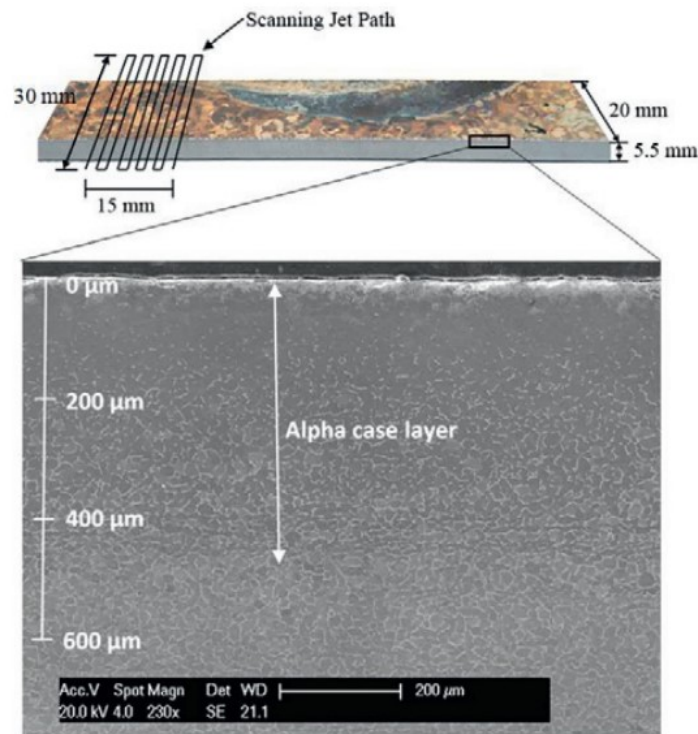


Fig. 2.85: Esquema da camada alpha case na amostra de Ti-6Al-4V e respetiva microscopia SEM [85]



## Capítulo 3

# Procedimento Experimental, apresentação dos resultados e sua discussão

As dissertações mais recentes realizadas no INEGI em parceria com a empresa *Zollern & Comandita* que abordaram o tema referente à maquinagem química de ligas de titânio para turbinas, designam-se por "Otimização do processo de obtenção de peças em aluminetos de titânio por fundição de precisão", efetuada por Francisco Torres e "Projeto e otimização de sistemas de alimentação e gitagem para peças em aluminetos de titânio" realizada por Nuno Pires. Contudo, o tema foi abordado superficialmente, sendo também os ensaios realizados num recipiente pequeno com cerca de 10 litros e sem agitação.

O presente trabalho tem o objetivo de realizar o processo de maquinagem química em condições industriais, de modo a viabilizá-lo em maior escala. Para isso serão realizados diversos ensaios numa tina apropriada para o efeito, com agitador acoplado, utilizando uma solução anteriormente usada de modo a conseguir obter valores de taxa de remoção de material, rugosidades, remoção da camada *alpha case* e também garantir uma remoção o mais homogénea possível. Para além dos objetivos referidos, foi também realizada uma comparação entre as turbinas anteriormente maquinadas quimicamente no INEGI com as maquinadas em condições industriais. Foi também testada uma outra solução de modo a comparar o aspeto das turbinas, taxas de remoção e rugosidades entre ambas as soluções testadas.

Devido à colaboração do INEGI com a *Zollern & Comandita* a maioria dos ensaios foram realizados nas instalações da ZCP, onde existem as condições necessárias para realizar um trabalho de qualidade, nomeadamente uma tina com cerca de 550 litros, com aquecimento do banho e agitador.

Este trabalho tem também o intuito de realizar o projeto e concepção de um molde em estereolitografia para a injeção de cera, destinado a uma pequena série de pás de turbina, com o propósito de se validar vazamentos, pois a peça possui um bordo de fuga com espessura bastante reduzida o que dificulta bastante o enchimento da peça.

Achou-se pertinente e interessante também, efetuar o projeto de um molde em alumínio para a mesma pá, para a injeção de cera em condições industriais.

No presente capítulo serão detalhados todos os procedimentos experimentais adotados.

### 3.1 Maquinagem química de ligas de titânio

Como foi referido anteriormente, o recurso a formulações mais reativas origina a formação da cama endurecida denominada por *alpha-case*. Esta camada, para que as peças possam ser utilizadas nas mais variadas aplicações, tem que ser removida. Desta forma, recorre-se ao processo de maquinagem química para a remoção de tal camada. Este processo revela também a possibilidade de remover o acréscimo de material existente nas peças *near-net shape* relativamente às *net shape*. Peças *near-net shape* possuem a vantagem de serem mais fáceis de encher, pois as zonas críticas são mais grossas comparativamente com as *net shape*. Contudo, para atingir as dimensões exatas ou aproximadas de uma peça *net shape* é necessária uma remoção de material uniforme. Como tal, os objetivos destes testes prendem-se com criar as condições necessárias para implementar o processo em ambiente industrial, onde se pretende obter uma remoção uniforme de material, taxas de remoção elevadas, remoção total da camada *alpha-case*, peças com superfícies pouco rugosas e um banho eficiente.

#### 3.1.1 Especificações da tina existente na ZCP

A ZCP na secção de eletropolimento possui uma série de tinas destinadas a vários processos de acabamento das peças lá produzidas. Juntamente com essas tinas existe uma, que é propriedade do INEGI, na qual serão efetuados os vários testes de maquinagem química. Tal tina possui uma capacidade de cerca de 550 litros, contendo uma mangueira onde circula água com o intuito de aquecer o banho e também um agitador para promover a circulação do banho, aspeto necessário no processo de maquinagem química. Na Figura 3.1 encontra-se a tina existente na ZCP, assim como o aspeto do seu interior onde se verifica a mangueira de aquecimento e o agitador.



Fig. 3.1: (a) Tina destinada aos testes de maquinagem química, (b) Interior da mesma

#### 3.1.2 Desenvolvimento de tabuleiro para colocação de turbinas

Devido à falta de renovação do banho e também à colocação das turbinas no fundo dos recipientes utilizados por Torres [33] e Pires [42], desenvolveu-se um tabuleiro a partir de uma placa de polietileno com 6 mm de espessura, com o intuito de evitar colocar as turbinas no fundo do cesto existente na tina. O material escolhido foi o polietileno pois este consegue suportar a corrosão dos ácidos utilizados. A placa foi cortada e puncionada

no INEGI de forma a dar origem a um tabuleiro com vários furos de secção quadrada de modo a poder haver circulação de banho. Com o material remanescente, cortaram-se placas de menores dimensões com o objetivo de fazer compartimentos para cada turbina, de modo a evitar contatos durante o processo de maquinagem química. Na Figura 3.2a, apresenta-se o aspeto dos vários componentes que constituem o tabuleiro. No Anexo A encontram-se os desenhos 2D dos componentes do tabuleiro.

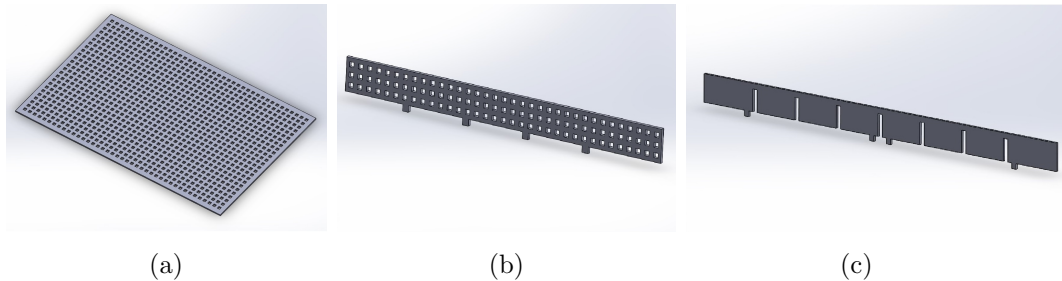


Fig. 3.2: Elementos que constituem o tabuleiro desenvolvido, (a) tabuleiro, (b) parede principal, (c) parede secundária

Posto isto procedeu-se à montagem dos vários componentes. Para a maquinagem de turbinas de dimensões idênticas às utilizadas, optou-se por colocar as paredes de forma a obter uma área de 70x70 mm. A vantagem da solução construtiva desenvolvida prende-se com o fato de se poder colocar as paredes de forma a criar compartimentos condizentes com o tipo de peças que se pretenda maquinar. Na Figura 3.3 encontra-se o tabuleiro após montagem e também o mesmo com uma turbina posicionada num compartimento.

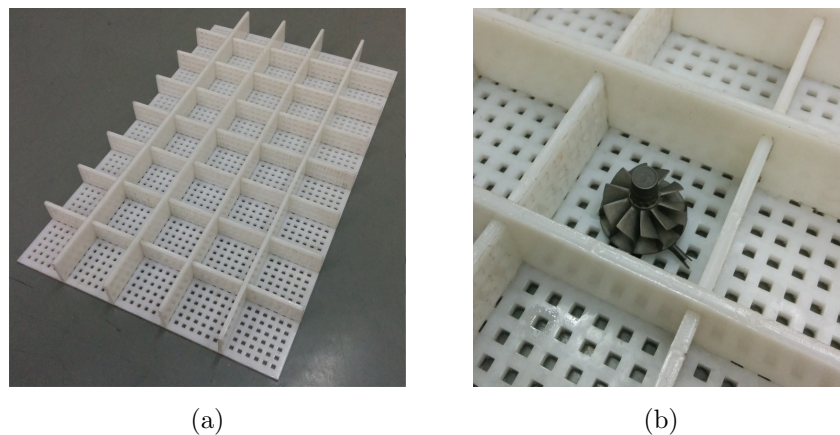


Fig. 3.3: Tabuleiro desenvolvido no presente trabalho, (a) Aspeto do tabuleiro, (b) Turbina posicionada no compartimento

### 3.1.3 Procedimento adotado durante os ensaios

Para a realização dos testes, utilizou-se a solução utilizada por Torres [33] e Pires [42] que obtiveram boas taxas de remoção, não conseguindo apenas uma remoção uniforme de material. Porém, esse problema acredita-se que será solucionado visto que a tina onde se irão realizar os testes tem incorporado um agitador. A solução utilizada encontra-se exposta na Tabela 3.1. No Anexo B disponibilizam-se fichas de segurança de cada ácido utilizado nesta solução.



Tabela 3.1: Constituintes da solução utilizada no primeiro teste de maquinagem química

Constituinte	Percentagem mássica (%)
Ácido Fluorídrico (HF)	4.5
Ácido Nítrico (HNO <sub>3</sub> )	7.5
<i>Erkantol</i>	5
Água (H <sub>2</sub> O)	83

O uso de *Erkantol* deve-se ao fato de este ser um agente molhante, o que permite uma maior molhagem das peças a maquinar.

Para a realização dos testes foi utilizada uma tina do INEGI existente na secção de eletropolimento da *Zollern & Comandita* devido à falta de condições do INEGI, cujo volume ronda os 550 litros (Figura 3.4). Não se encheu totalmente a mesma, visto que seria um desperdício dos constituintes, optando-se por encher apenas com 250 litros de solução, pois seria um nível que cobriria o cesto utilizado para alocar as peças a maquinar. Dentro do cesto colocou-se o tabuleiro em polietileno, descrito em 3.1.2. A tina é aquecida por um termoacumulador atingido uma temperatura máxima de 35 °C.

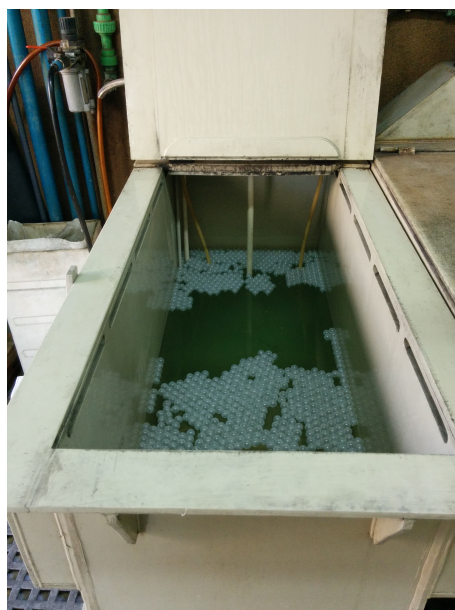


Fig. 3.4: Tina utilizada para os ensaios de maquinagem química

O procedimento seguido para poder iniciar os testes é caracterizado pelos seguintes passos:

1. Introdução dos constituintes do banho na tina em ordem crescente de perigosidade, primeiro a água, seguindo-se o ácido nítrico e depois o ácido fluorídrico. Por fim colocou-se o *Erkantol*, pois caso fosse colocado antes do HF poderia desencadear uma reação devido à turbulência gerada durante a introdução do HF na tina;
2. Inserção no banho de titânio puro na proporção de 1g/l para ativar a solução estipulada;



3. Fixação do tabuleiro ao cesto, utilizado para colocação das peças a maquinar, com recurso a braçadeiras;
4. De acordo com 2.5.1.3 colocaram-se 400 bolas flutuantes de modo a controlar a taxa de evaporação do banho, contudo estas foram insuficientes para cobrir toda a área superficial. Posteriormente foram adicionadas 800 bolas de modo a cobrir a área restante, como se verifica na Figura 3.5;



Fig. 3.5: Tina com a superfície coberta de bolas anti evaporação

5. Teste ao agitador existente na tina de forma a indagar qual a velocidade do motor.

Após o teste ao agitador, verificou-se que este não possuía variação de velocidade, sendo a única que tinha, excessiva para o que se desejava. A elevada velocidade causava uma grande turbulência no banho, originando uma vibração enorme em todo o sistema. Esta turbulência é prejudicial ao banho, pois gera imensa espuma no mesmo, levando também a um aumento da evaporação da água existente nele e ao escape do ácido fluorídrico. Para contornar este problema, instalou-se um variador de frequência de modo a poder controlar a rotação do motor.

O aparecimento do problema do agitador levou a um atraso de uma semana na realização do primeiro teste de maquinagem química. Ou seja, durante essa semana o banho esteve parado na tina sem ser utilizado. Aquando da colocação do variador de frequência, abriu-se a tina e verificou-se que o nível do banho tinha sofrido um decréscimo de cerca de 150 mm, o que equivale a cerca de 100 litros de solução. Esta ocorrência deve-se à evaporação da água existente na solução. A evaporação acontece devido ao facto de o sistema de aquecimento da ZCP estar ligado em série a todas as tinas existentes no local. Como todas as restantes tinas são utilizadas diariamente a temperaturas entre 25 °C e 50 °C, a tina que contém o banho também é afetada por esse aquecimento perdendo água e também ácido fluorídrico pois este torna-se gasoso a temperaturas inferiores à temperatura ambiente (cerca de 20 °C).

No momento de se proceder ao início dos testes, verificou-se que a caldeira de aquecimento da tina estava programada para 25 °C, quando o máximo que a mesma atinge são

35 °C. Para aumentar a temperatura do banho, adicionou-se os 100 litros de água quente, também para compensar as perdas por evaporação. Posto isto quando se avançou para o início dos testes o banho encontrava-se a 40 °C. Contudo, surgiu um contratempo com as braçadeiras colocadas no cesto, pois reparou-se que estas foram totalmente removidas durante a semana de exposição à solução. Logo, teve que se retirar o cesto da tina e colocar novas braçadeiras para prender o tabuleiro ao cesto. Finalizada esta operação, pode-se então dar início aos ensaios.

O procedimento adotado durante os ensaios encontra-se patente na Figura 3.6.

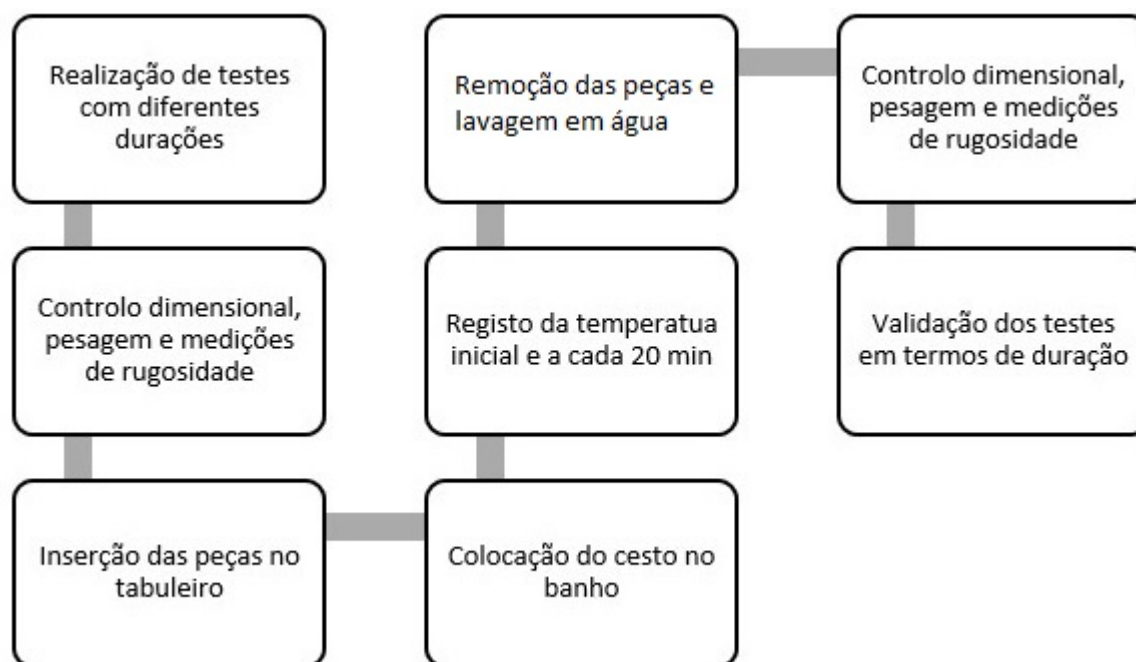


Fig. 3.6: Procedimento adotado durante os ensaios de maquinagem química

### 3.1.4 Ensaios com turbinas *net shape* de TiAl

De modo a testar a capacidade do banho em ambiente pré-industrial e averiguar taxas de remoção e homogeneidade da remoção, realizaram-se vários testes em turbinas *net shape* em TiAl com cerca de 42 mm de diâmetro, nomeadamente a liga Ti-33.5Al-4.8Nb-1.0Cr-0.2Si, vazadas em carapaças com *facecoat* de ítria, fornecidas pela *Zollern & Comandita* apresentando-se um exemplar na Figura 3.7.

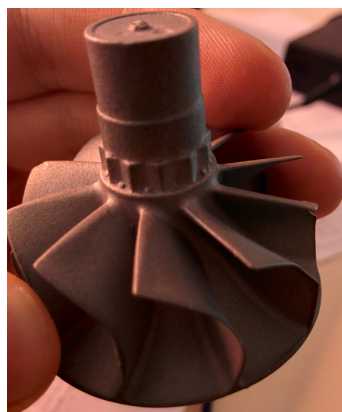


Fig. 3.7: Turbina *net shape* de TiAl utilizada nos primeiros testes de maquinagem química

Tal como foi referido anteriormente a temperatura inicial do banho foi de 35 °C, variando ao longo do tempo de teste como se verifica na Figura 3.8.

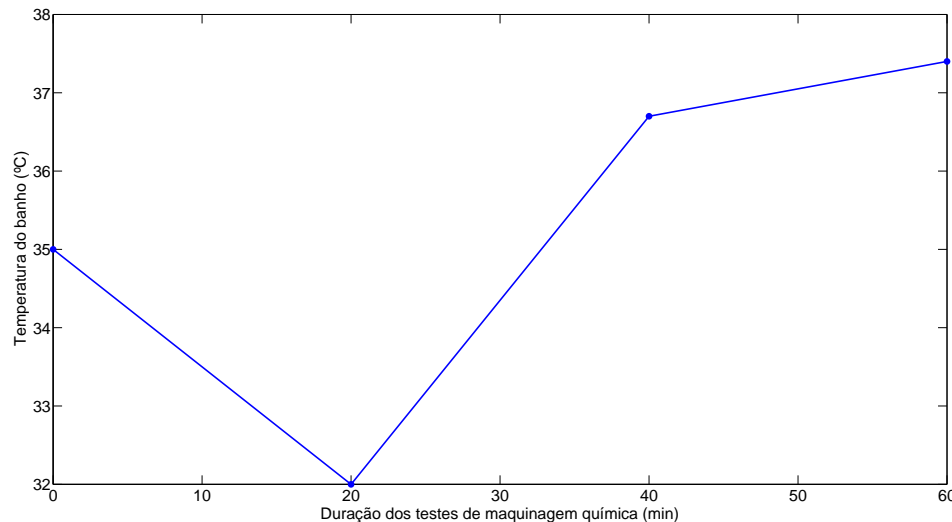


Fig. 3.8: Variação da temperatura do banho em função do tempo

A queda de temperatura entre o instante inicial e os primeiros 20 minutos, deve-se ao facto de o termoacumulador indicar 27 °C. Logo, como a água inserida na tina estava quente, esta arrefeceu até aos 32 °C. Contudo, a partir dos 20 minutos de teste, a temperatura do banho começou a subir até atingir os 37,4 °C no instante final. Isto deve-se ao fato de a reação entre o banho e as turbinas ser exotérmica.

Durante a realização destes ensaios apenas variou a duração do mesmos, tendo estes variado entre os 40 e os 70 minutos. A escolha de duração de teste a partir de 40 minutos, deve-se ao fato de Torres [33] e Pires [42] terem alcançado a remoção desejada de 0,4 mm em turbinas *near-net shape* a temperatura de banho de 50 °C. Como neste caso a temperatura inicial era de 35 °C e como a taxa de remoção é maior quanto maior for a temperatura de banho, pensou-se em realizar ensaios mais longos, ou seja, até aos 70 minutos.

Relativamente à rotação do agitador, esta foi constante, sendo de 290 rpm. O valor comparativamente com a capacidade do mesmo é baixo, mas decidiu-se optar por esta por parecer indicada, pois não criava a formação de espuma nem gerava demasiada turbulência que prejudicaria a solução.

As turbinas disponibilizadas pela *Zollern & Comandita*, foram então agrupadas em grupos de 3, o primeiro grupo para teste de 40, 50, 60 e 70 minutos, para o segundo, terceiro e quarto grupo respetivamente. Relativamente ao teste de 70 minutos, este não foi realizado totalmente, tendo sido retiradas as turbinas após 60 minutos, pois visualizou-se que a remoção de 60 minutos já apresentava remoção excessiva nas alhetas, como se verifica na Figura 3.9. Mesmo assim estas foram contabilizadas nos resultados obtidos.

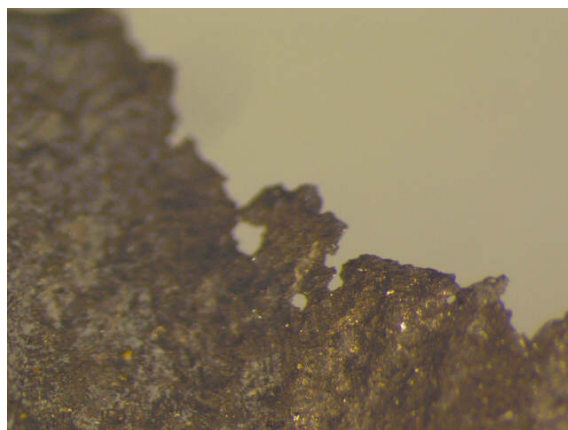


Fig. 3.9: Bordo de alheta com remoção excessiva de material

As turbinas foram designadas cada uma com um código de modo a poderem ser distinguidas, cada uma teve a designação A, B ou C referente a cada turbina para uma determinada duração e 1, 2, 3 e 4 referente a cada teste efetuado. Ou seja, 1 é referente a 40 minutos de teste, 2 a 50 minutos e 3 e 4 referentes a 60 minutos. Por exemplo a primeira turbina do teste de 40 minutos é a A1, enquanto que a segunda turbina do teste de 40 minutos é a B1 e assim sucessivamente.

Na Tabela 3.2 apresentam-se os resultados em termos de redução de peso de cada uma das turbinas maquinadas durante os ensaios.

Tabela 3.2: Resultados de redução de peso das turbinas testadas

Código	Duração (min)	Pesagem inicial (g)	Pesagem após maquinagem (g)	Metal removido (g)	Metal removido (%)	Taxa de remoção (g/min)
A1	40	52,1922	47,5864	4,60580	8,820	0,1151
B1	40	52,3476	47,0622	5,2854	10,10	0.1321
C1	40	51,3202	46,3026	5.0176	9,770	0.1254
A2	50	53,6489	46,4877	7,1612	13,35	0.1432
B2	50	53,2026	46,4494	6,7532	12,69	0.1350
C2	50	53,2114	47,2008	6,0106	11,30	0.1202
A3	60	52,2573	45,6827	6,5746	12,58	0.1096
B3	60	53,2802	46,5085	6,7717	12,09	0.1128
C3	60	53,9679	46,5644	7,4035	13,72	0.1233
A4	60	49,7497	43,6558	6,0939	12,25	0.1016
B4	60	51,4820	43,8840	7,5980	14,79	0.1266
C4	60	51,4279	44,2745	7,1534	13,91	0.1192

Tendo em conta os resultados da Tabela 3.2, é possível afirmar que houve uma intensificação de remoção de material com o aumento da duração do teste de 40 para 50 minutos, tal como era esperado. Contudo, isso não se verificou comparativamente com o aumento de exposição ao banho de 50 para 60 minutos. A razão pela qual a taxa de remoção diminui dos 50 para os 60 minutos, pode ser relacionada com a formação de uma camada desconhecida que aumentou de quantidade proporcionalmente com o aumento da duração dos testes. A formação de tal camada, poderá ter inibido a reação entre a tur-

bina e o banho, fazendo com que a taxa de remoção diminuísse (no subcapítulo 3.1.4.1 será abordada a formação de tal camada). No entanto, a taxa de remoção permaneceu relativamente constante entre os 0,11 e os 0,13 g/min como comprova a Figura 3.10.

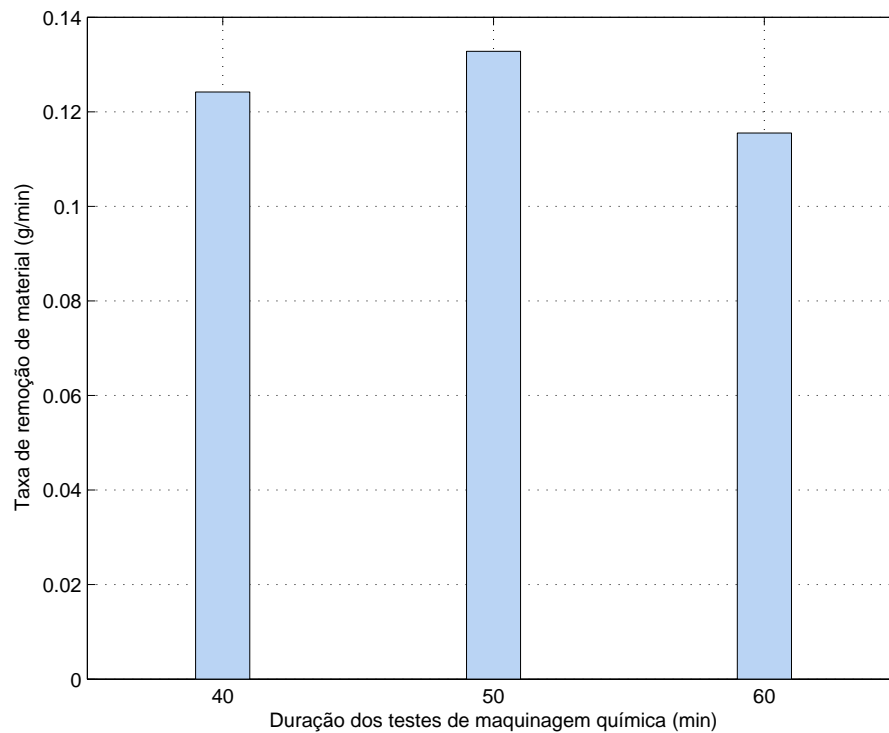


Fig. 3.10: Resultados da taxa de remoção para diferentes durações de testes de maquinagem química

Foi igualmente realizado o controlo dimensional antes e após maquinagem química. Assim sendo, realizaram-se medições de espessura em cada uma das alhetas e no tarugo antes do processo de modo a comparar com as medições efetuadas após o mesmo. Na Tabela 3.3 encontram-se os resultados obtidos para a remoção de material nas alhetas. Devido ao fato de cada turbina possuir 10 alhetas realizou-se a média das alhetas de cada turbina maquinada.

Tabela 3.3: Resultados de redução de espessura nas turbinas submetidas a maquinagem química

Código	Secção	Espe. inicial (mm)	Espe. final (mm)	Redução espessura (mm)	Redução espessura (%)	Taxa de redução média (mm/min)
A1	Alhetas	0,4250	0,1180	0,3070	72,26	0.007820
	Tarugo	11,71	11,40	0,3100	2,650	
B1	Alhetas	0,4490	0,1370	0,3120	69,49	
	Tarugo	11,68	11,33	0,3500	2,990	
C1	Alhetas	0,5000	0,2020	0,2980	59,60	
	Tarugo	11,64	11,34	0,3400	2,580	
A2	Alhetas	0,4890	0,1360	0,3530	72,19	0.007090
	Tarugo	11,69	11,35	0,3400	2,910	
B2	Alhetas	0,4620	0,1010	0,3610	78,14	
	Tarugo	11,69	11,35	0,3400	2,910	
C2	Alhetas	0,4820	0,1290	0,3530	73,24	
	Tarugo	11,63	11,25	0,3800	3,280	
A3	Alhetas	0,4740	0,06500	0,4090	86,30	0.006800
	Tarugo	11,68	11,29	0,3900	3,340	
B3	Alhetas	0,4820	0,07600	0,4060	84,23	
	Tarugo	11,67	11,25	0,4200	3,600	
C3	Alhetas	0,5050	0,09700	0,4080	80,79	
	Tarugo	11,61	11,18	0,4300	3,700	
A4	Alhetas	0,4470	0,05400	0,3930	87,92	
	Tarugo	11,81	11,40	0,4100	3,470	

De acordo com a Tabela 3.3 e a Figura 3.11, conclui-se que a redução de espessura manteve-se praticamente constante com a variação da duração dos testes, rondando os 0.007 mm/min. Assim, através destes resultados é possível entender qual a duração adequada para a remoção de um certo valor de espessura. Por exemplo, para o caso de se pretenderem maquinar turbinas *near-net shape*, em que a remoção desejada é de 0,4 mm, a duração poderá ser de 60 minutos. Contudo, como estas não detêm a mesma área superficial que as turbinas *net shape*, a estimativa de 60 minutos de duração de ataque estará sujeita a um erro que pode ser mais ou menos grosseiro.

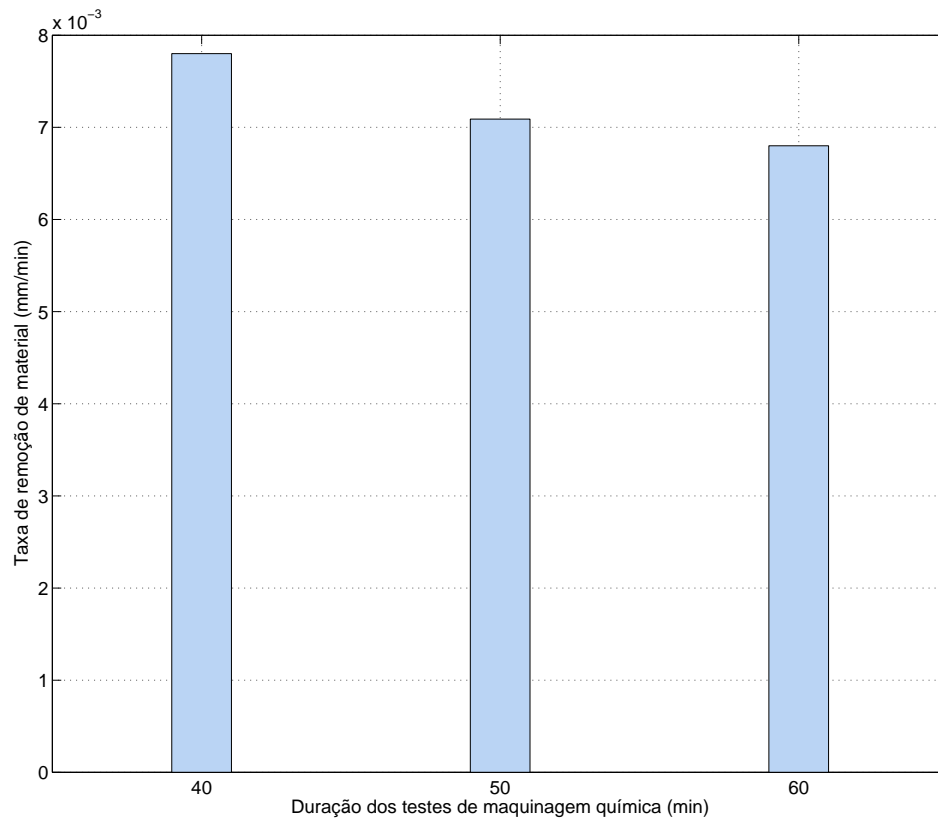


Fig. 3.11: Resultados da taxa de redução de espessura para diferentes durações de testes de maquinagem química

Para além das turbinas utilizadas para este teste, foi colocada no banho durante 20 minutos uma chapa de Ti-6Al-4V (Figura 3.12) de geometria conhecida, com intuito de controlar a uniformidade da remoção de material, pois como se trata de uma peça de geometria simples, o controlo dimensional da mesma será uma tarefa também simples. Na Tabela 3.4 encontram-se os resultados de redução das dimensões e de peso da chapa testada.

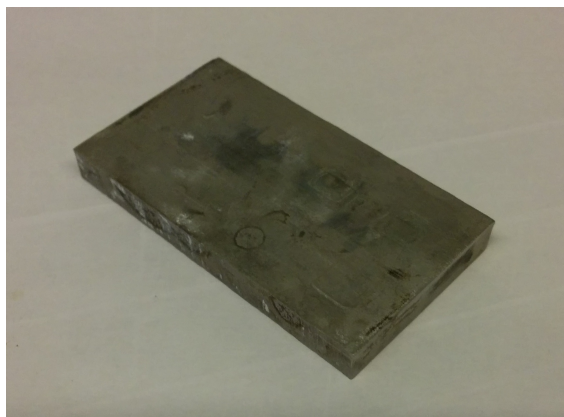


Fig. 3.12: Chapa de Ti-6Al-4V para facilitar controlo dimensional



Tabela 3.4: Resultados das medições e pesagens da chapa antes e após maquinagem química

	Antes MQ	Após MQ	Redução	Redução (%)
largura (mm)	28.3000	28.0000	0.30000	1.06007
comprimento (mm)	50.7200	50.4100	0.31000	0.61120
espessura (mm)	5.77000	5.54000	0.23000	3.98610
peso (g)	36.0009	34.1106	1.89030	5.25070

Daqui pode-se concluir que a remoção de material na largura e no comprimento foi uniforme, o mesmo não acontece relativamente à espessura. Isto deve-se à colocação da chapa no tabuleiro desenvolvido para o suporte das peças, ou seja, a face inferior da chapa encontra-se totalmente tapada não existindo aí remoção de material.

Durante a realização dos testes, foram recolhidas amostras do banho de modo a se poder efetuar análises químicas à solução e também compreender qual a concentração de titânio no mesmo.

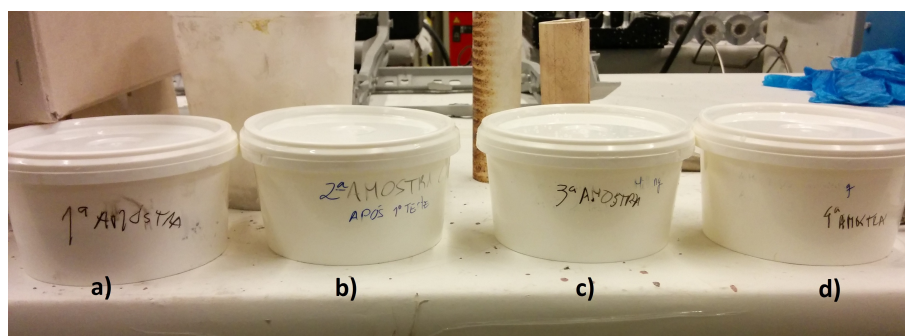


Fig. 3.13: Amostras recolhidas durante os teste, a) Antes do início dos testes, b) Após 40 minutos, c) 50 minutos e d) 60 minutos

Essas amostras foram também utilizadas para a realização de medições de pH em cada uma delas. Para isso foram utilizadas tiras com 4 barras coloridas que alteram a sua cor consoante o pH da solução onde a tira é introduzida. Na Figura 3.14 (a) encontra-se a escala de pH com a respetiva cor de cada valor. A medição de pH foi realizada com o intuito de verificar se o pH da solução tinha aumentado, o que indicaria que haveria a perda de um dos ácidos nomeadamente do HF. No entanto, como se observa na Figura 3.14 (b), o pH da solução mantém-se bastante ácido, entre 1 a 3 de acordo com a escala deste método.



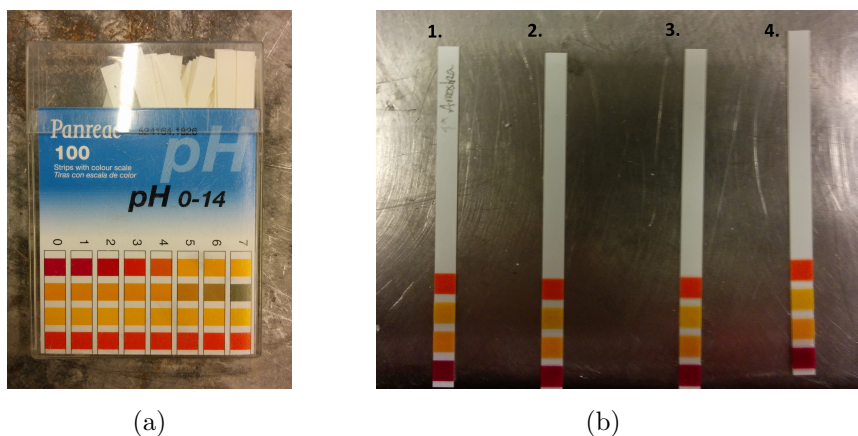


Fig. 3.14: Tiras utilizadas para a medição de pH, (a) Escala colorida indicadora do pH da solução, (b) Resultados de pH das quatro amostras recolhidas, 1. Amostra antes do primeiro teste, 2. Amostra após o ensaio de 40 minutos, 3. Amostra após o ensaio de 50 minutos, 4. Amostra após o ensaio de 60 minutos

Como este método de medição de pH apresenta pouca precisão, achou-se relevante fazer a medição do mesmo com um medidor eletrônico normalmente utilizado no INEGI para controlo de pH de barbotinas. Decidiu-se apenas fazer a medição da 1<sup>a</sup> e 4<sup>a</sup> amostras pois não se quis realizar muitas medições de modo a evitar contaminar as barbotinas. Na Figura 3.15 encontra-se presente o medidor de pH e as amostras recolhidas do banho.

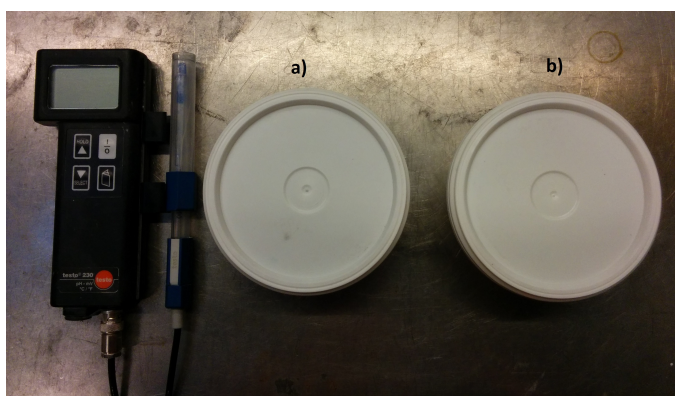


Fig. 3.15: Medidor de pH e amostras recolhidas, a) Antes do início dos testes e b) após 60 minutos de imersão

Após a medição de pH verificou-se que a 1<sup>a</sup> amostra apresentava um pH de 2,4, enquanto que a 4<sup>a</sup> amostra apresentava 3,04. Podendo-se concluir que os valores estão dentro do intervalo anteriormente determinado.

#### 3.1.4.1 Superfície apresentada pelas turbinas após maquinagem

Após a realização de cada um dos testes, tornou-se possível visualizar a microestrutura superficial, ou seja, alguns grãos, de algumas turbinas nomeadamente as maquinadas durante 40 minutos. Também se verificou a existência de uma camada branca incrustada nas turbinas. Observa-se que a quantidade desta camada é proporcional ao aumento da duração de exposição à solução utilizada para realizar o ataque, como se verifica na Figura 3.16.

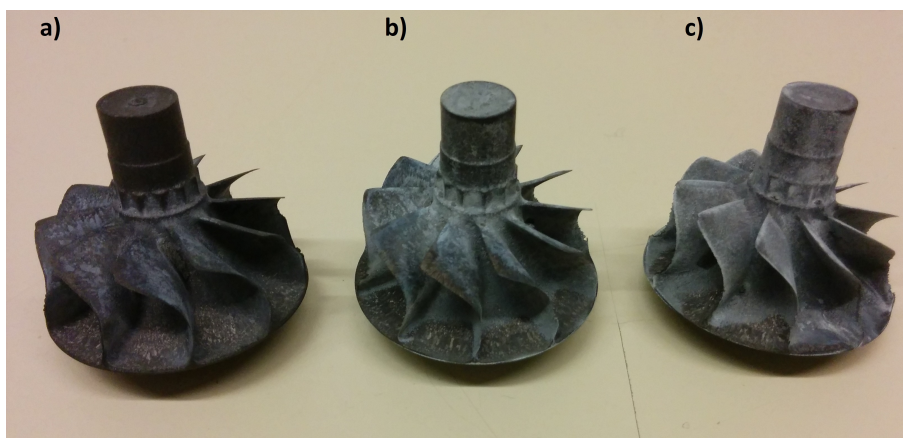


Fig. 3.16: Camada presente na superfície das turbinas, a) 40 minutos, b) 50 minutos e c) 60 minutos

É patente na Figura 3.16 que a turbina sujeita a 60 minutos de maquinagem química se encontra quase totalmente coberta por tal camada, sendo a origem da mesma desconhecida. No entanto esta ocorrência poderá estar ligada a uma série de fatores tais como a velocidade de rotação baixa do agitador, a utilização de *Erkantol* como agente molhante, pois desconhece-se que tipo de reação ocorre entre este e os reagentes existentes no banho, défice de concentração de algum dos ácidos ou a deposição da camada de hidrogénio relatada no subcapítulo 2.5.1. De modo a identificar a composição de tal camada, decidiu-se recorrer ao microscópio SEM. Entretanto decidiram-se realizar vários testes de modo a averiguar a origem de tal camada.

Primeiro, realizou-se um teste com umas turbinas designadas por turbina de teste (Figura 3.17). O objetivo deste teste prendeu-se com perceber se durante a perda de banho por evaporação, se perdeu ácido fluorídrico por se tratar de um químico volátil, visto que o seu ponto de ebulição é pouco inferior à temperatura ambiente, e se essa perda causou o aparecimento da camada desconhecida referida anteriormente



Fig. 3.17: Turbina de teste

Utilizaram-se duas turbinas deste tipo, em que uma foi submetida durante 20 minutos a um banho a 35 °C composto pelos mesmos constituintes da solução anteriormente utilizada menos o ácido fluorídrico. Enquanto que a outra foi submetida à solução normal durante os mesmos 20 minutos. Na Figura 3.18 encontra-se o aspeto de as turbinas após os ensaios.

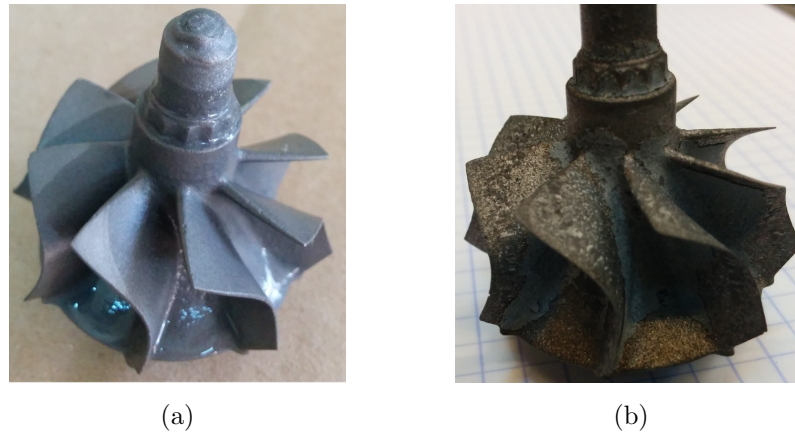


Fig. 3.18: Turbinas testadas, (a) sem ácido fluorídrico, (b) com solução apresentada na Tabela 3.1

Analisando ambas as turbinas, deparamos-nos que a turbina exposta a uma solução sem ácido fluorídrico se encontra num estado quase igual ao aspeto inicial, logo tal como era esperado o ácido nítrico não é o causador da formação da camada oxidada depositada nas turbinas. Relativamente à turbina exposta à solução com HF encontra-se num estado normal, ou seja, o banho atuou removendo material, como demonstra a Figura 3.19.



Fig. 3.19: Turbina exposta à solução contendo ácido fluorídrico

Conclui-se então que não houve perda total de ácido fluorídrico e que dos constituintes da solução apenas o HF e o *Erkantol* podem ser os causadores do aparecimento da camada existente nas turbinas anteriormente testadas.

De modo a verificar se o agente molhante originava a camada detetada na superfície das turbinas, realizou-se um ensaio sem *Erkantol* nas mesmas condições das anteriormente utilizadas, ou seja, temperatura de serviço 35 e duração de 50 minutos.

Para isso, preparou-se uma solução de 4 litros num recipiente aquecido com água através de uma resistência como se observa na Figura 3.20. Esta foi ligada a um controlador que mantém a temperatura do banho constante através de um termopar do tipo K mergulhado na água.



Fig. 3.20: Sistema utilizado para a realização do teste sem *Erkantol*

Visualizando a Figura 3.21 observa-se que mesmo sem a presença de *Erkantol* na solução, dá-se a formação da camada desconhecida. Também se atenta que houve uma remoção quase total das alhetas da turbina utilizada neste ensaio, esta deve-se ao demasiado tempo de exposição das turbinas ao banho e também ao aumento exponencial da temperatura do mesmo devido à reação exotérmica existente entre a solução e o material da turbina.



Fig. 3.21: Turbina *near-net shape* com cerca de 42 mm de diâmetro após a realização do teste sem *Erkantol*

#### 3.1.4.2 Microscopia eletrônica de varrimento das turbinas maquinadas

Com o objetivo de averiguar a composição da camada branca desconhecida depositada na superfície das turbinas maquinadas, achou-se pertinente recorrer à microscopia eletrônica de varrimento para apurar o pretendido. Para isso foram escolhidas três turbinas, maquinadas 40, 50 e 60 minutos respetivamente, uma vez que a olho nu notava-se que a quantidade de camada depositada aumentou com o aumento de duração de exposição ao banho. Como o equipamento SEM (Figura 3.22a) tem limitações de tamanho das amostras, cortaram-se fragmentos de uma alheta e da base de cada turbina, como se verifica na Figura 3.22b.



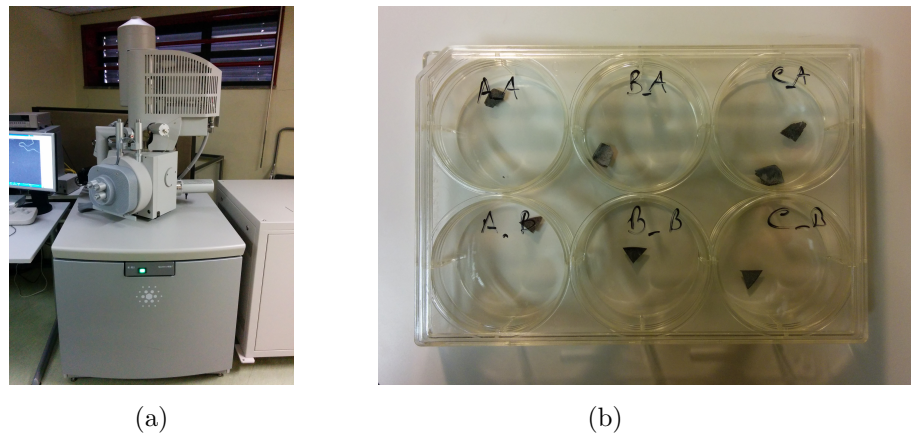


Fig. 3.22: Microscopia eletrônica de varrimento, (a) microscópio, (b) amostras

Relativamente à designação das amostras presentes na Figura 3.22b, o primeiro A, B e C é referente à turbina exposta à solução durante 40, 50 e 60 minutos respetivamente, enquanto que o segundo A e B, referem-se a alheta e base.

Posteriormente colocaram-se as amostras de cada turbina no porta amostras, juntamente com um fragmento do disco de corte de modo a poder obter um espectro (EDS - *Energy Dispersive Spectroscopy*) de constituintes de cada amostra. A junção do disco deveu-se ao fato de o corte poder induzir alguma modificação nas amostras e caso isso aconteça poder-se-ia recorrer a esse fragmento do disco para determinar os seus constituintes e assim entender a origem dos mesmos na composição das amostras das turbinas. Na Figura 3.23 apresenta-se o porta amostras pronto para ser colocado no interior do SEM.

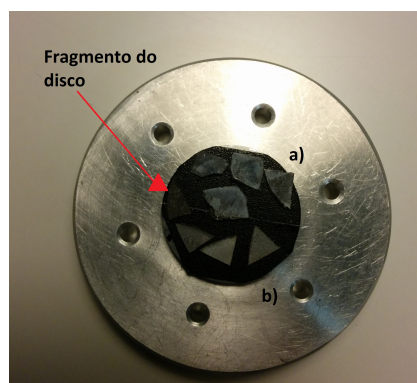


Fig. 3.23: Porta amostras com as amostras das turbinas e do disco de corte, a) parte superior com os fragmentos das alhetas de cada turbina, b) parte inferior com fragmentos da base das turbinas

Colocado o porta amostras no SEM, deu-se início à realização da análise microscópica. Começou-se pela alheta da turbina de 40 minutos,  $A_A$ , em que se observa no espectro global (Figura 3.24) a existência já esperada de titânio, alumínio, nióbio, crómio e silício que constituem a liga, como se referiu em 3.1.4. Também se verifica a existência de flúor originado do HF, algum sódio e cloro talvez devido à utilização de *Erkantol* e por último uma elevada quantidade de oxigénio, o que significa que a camada branca desconhecida se pode tratar de dióxido de titânio ( $TiO_2$ ).

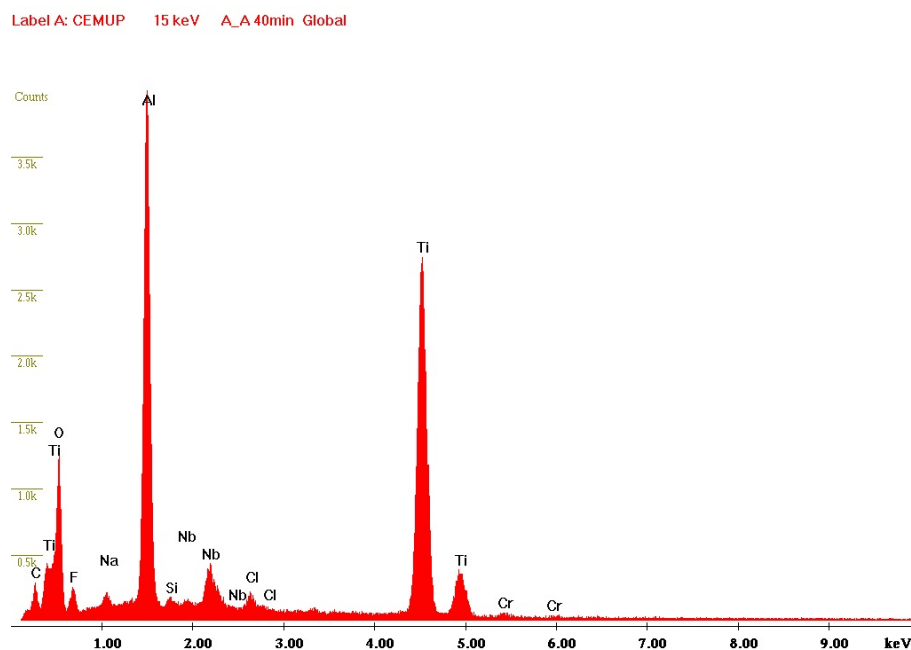


Fig. 3.24: Espectro global de constituintes da amostra  $A_A$

Posteriormente foi determinado o espectro de constituintes em duas zonas distintas, designadas por Z1 e Z2. Atente-se à Figura 3.25, onde se observam essas duas zonas, em que Z1 corresponde à camada depositada na superfície da alheta, e Z2 ao material base da turbina, ou seja, TiAl.

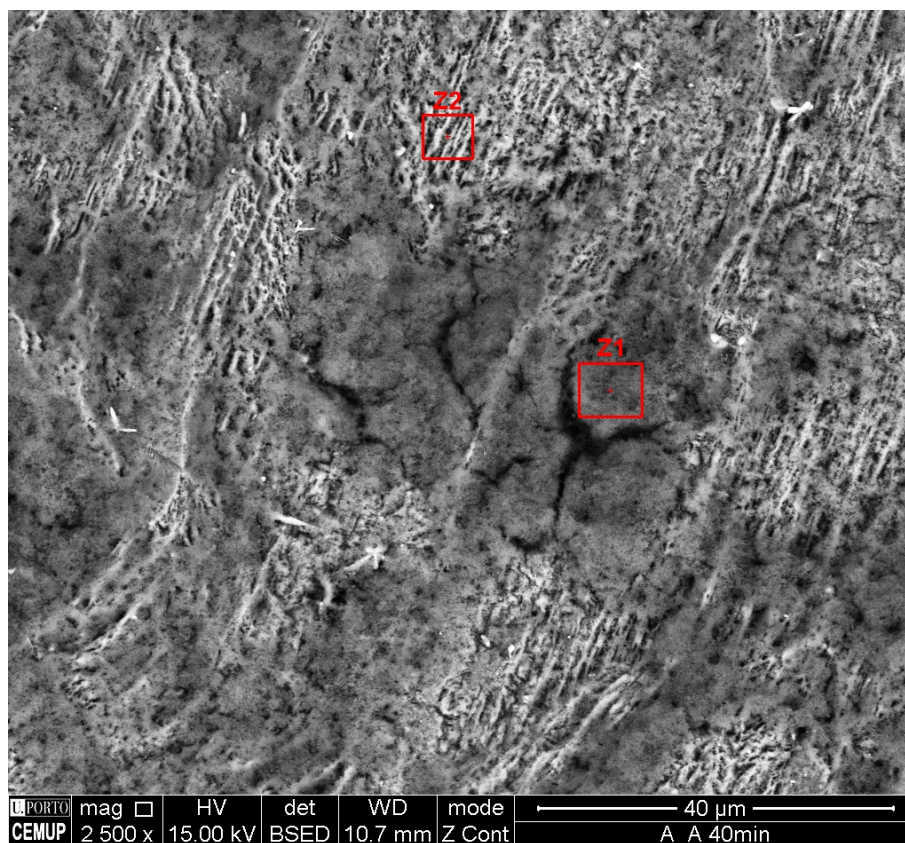


Fig. 3.25: Zonas Z1 e Z2 da amostra  $A_A$

Na Figuras 3.26 e 3.27 apresentam-se os espectros das zonas Z1 e Z2 da alheta da turbina  $A_A$ . Relativamente à zona Z1 nota-se que os constituintes da camada se encontram perceptíveis, ou seja, a camada de cor branca na superfície é constituída por oxigénio e titânio logo pode-se afirmar tratar de  $TiO_2$ .

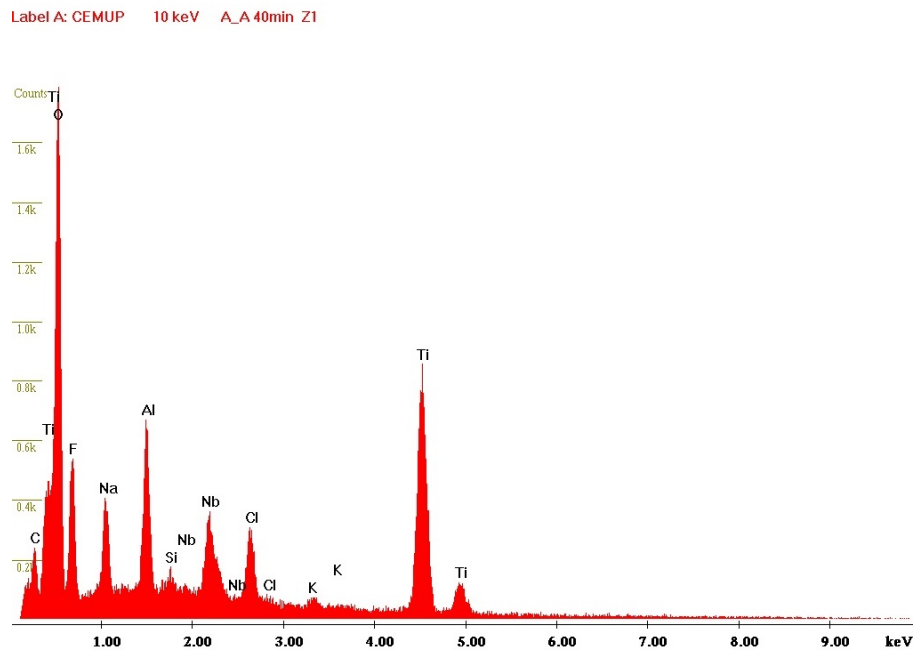


Fig. 3.26: Espectro de constituintes da zona Z1 da amostra  $A_A$

No que respeita ao espectro da zona Z2, são perceptíveis os constituintes da liga em maioria e também sódio, cloro, fluor e carbono, mas em quantidades reduzidas.

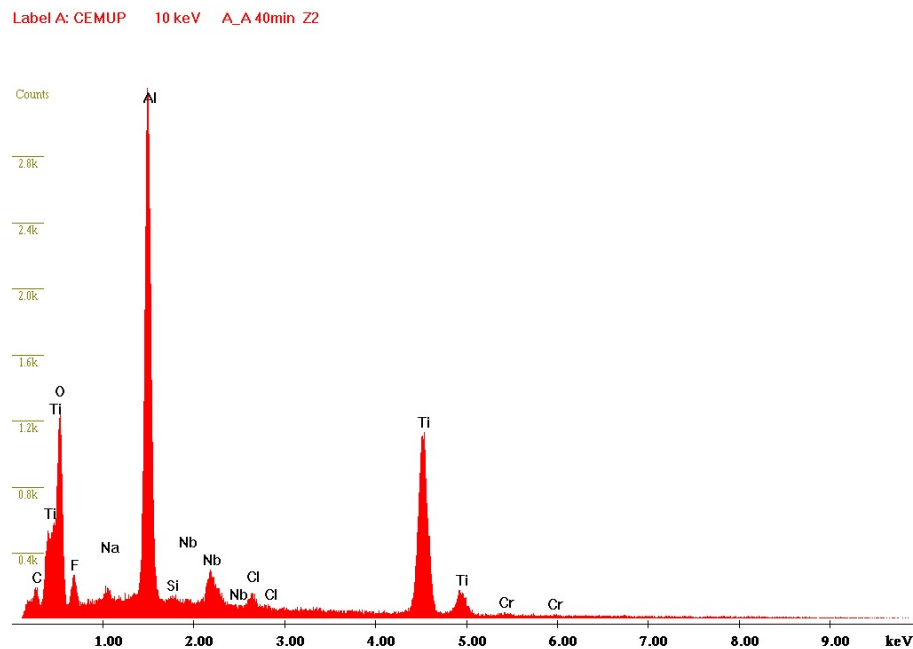


Fig. 3.27: Espectro de constituintes da zona Z2 da amostra  $A_A$

Relativamente ao espectro da base da turbina, a amostra  $A_B$ , este é bastante idêntico ao acima apresentado na Figura 3.24.

No que concerne ao espectro global de constituintes da alheta da turbina exposta a maquinagem química durante 50 minutos,  $B_A$ , apresentado na Figura 3.28, esta possui um espectro idêntico ao alheta da amostra  $A_A$ , no entanto não se verifica a existência de cloro nem sódio.

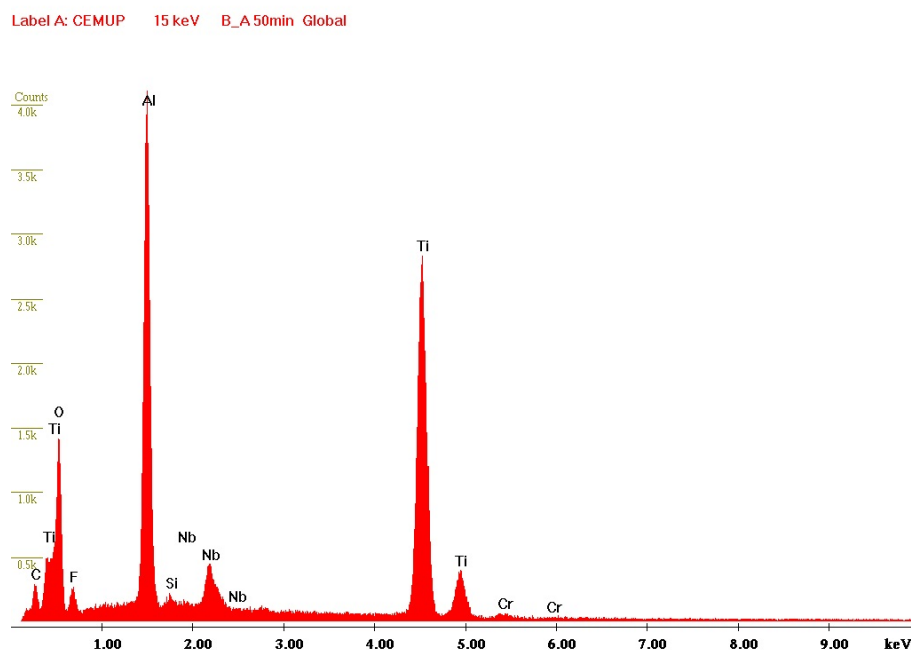


Fig. 3.28: Espectro global de constituintes da amostra  $B_A$

O mesmo já não se sucede na base da amostra  $B_A$ , em que se observa na Figura 3.29 a presença destes dois elementos químicos. Podendo-se concluir que a existência de cloro e sódio na parte inferior da base e não na alheta se deve à lavagem das turbinas após MQ com recurso a chuveiro de água. Como esta operação de limpeza não é uniforme, podem haver zonas onde incidiu mais água do que outras, originando esta discrepância entre espectros.



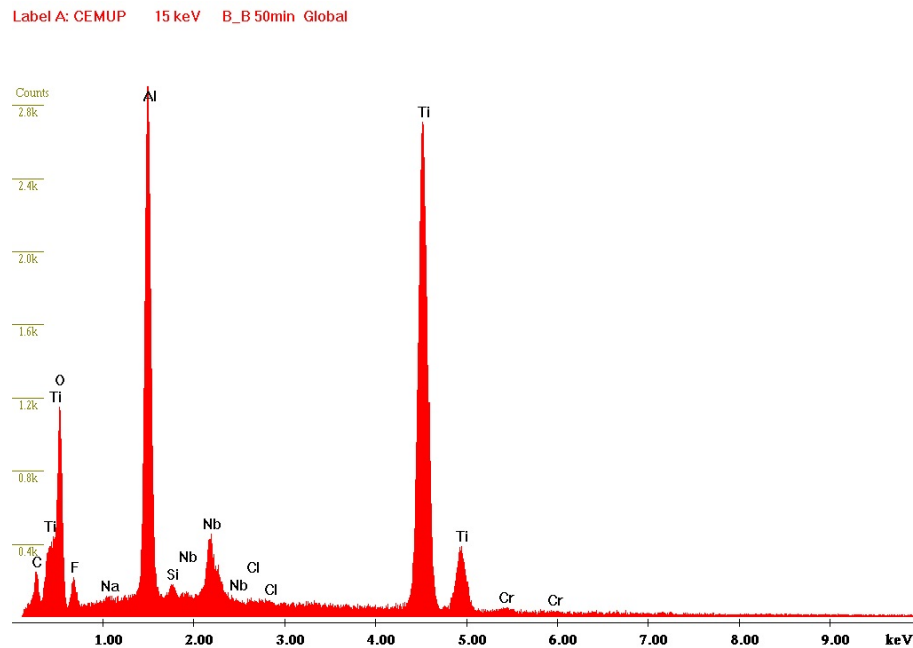


Fig. 3.29: Espectro global de constituintes da amostra  $B_B$

Com o intuito de verificar de forma mais limpa o espectro de constituintes da camada depositada nas turbinas, colou-se uma porção de fita de carbono na superfície da alheta da turbina. Na Figura 3.30 apresenta-se o espectro de constituintes do pó agarrado à fita de carbono. Como se pode observar existe uma predominância de carbono originário da fita, algum nióbio, titânio e alumínio da liga das turbinas e fluor do ácido fluorídrico, o restante é oxigénio e titânio que são os constituintes da camada. Ou seja, a cor branca que as turbinas adquiriram devem-se a uma oxidação.

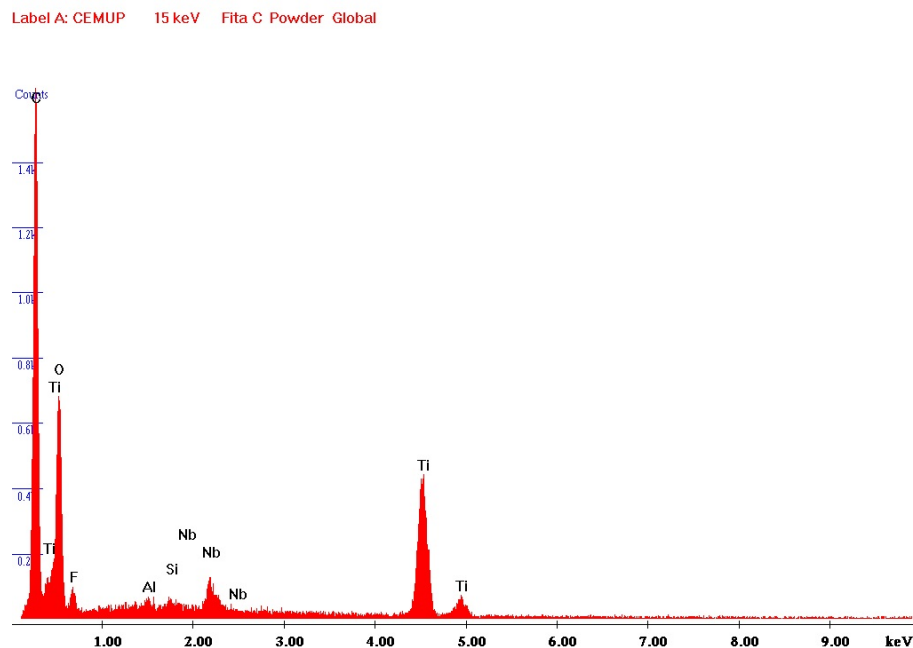


Fig. 3.30: Espectro global de constituintes da fita de carbono com pó da camada depositada nas turbinas

Com o intuito de não alongar demasiado este subcapítulo, encontram-se no Anexo C

os restantes espectros de constituintes, assim como algumas imagens das várias amostras.

### 3.1.4.3 Controlo dimensional

De modo a verificar com precisão se a agitação utilizada garantiu a homogeneidade de remoção pretendida, achou-se relevante submeter algumas das turbinas a um controlo dimensional.

Tal controlo foi efetuado através do levantamento de forma das turbinas, antes e após maquinagem química, com recurso a um equipamento de levantamento de forma *ATOS III Triple Scan* da *GOM*, presente na Figura 3.80. Para se obter a digitalização das turbinas, foram colados vários pontos brancos na superfície das mesmas, para efeitos de reconhecimento do equipamento (Figura 3.32). Posto isto, foi feita uma sobreposição da geometrias das turbinas

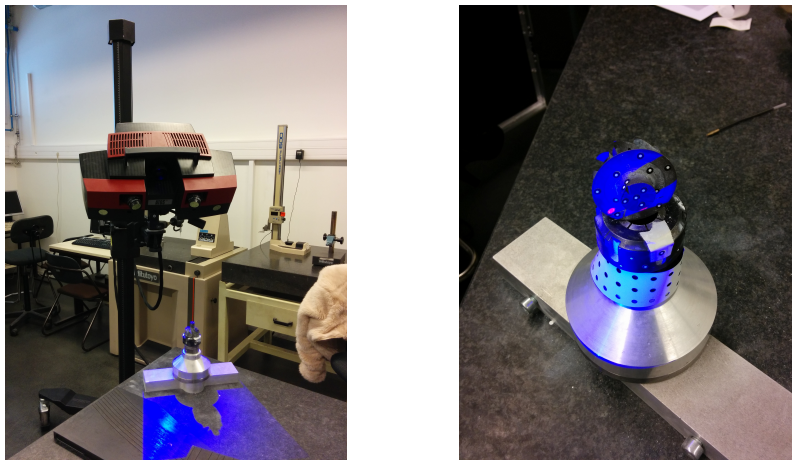


Fig. 3.31: Equipamento de levantamento de forma e turbina a ser digitalizada para o computador

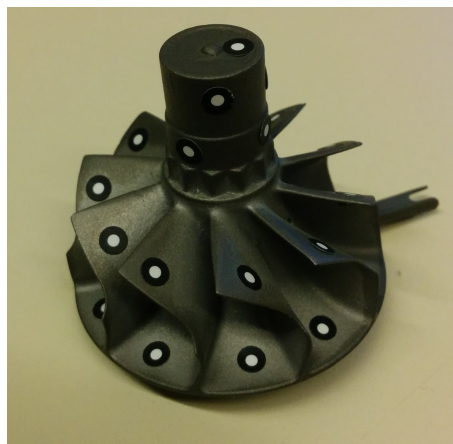


Fig. 3.32: Turbina *net shape* com cerca de 42 mm de diâmetro com alvos colados na sua superfície

Na Figura 3.33 encontra-se a sobreposição da geometria da peça não maquinada com a geometria da peça maquinada quimicamente durante 40 minutos. Como se pode observar, com auxílio da escala colorida junto à turbina, a remoção de material pode ser considerada maioritariamente uniforme. Contudo, como se observa na parte inferior a vermelho,

verifica-se que essa zona não obteve qualquer remoção o que indica que relativamente à parte inferior da turbina, o tabuleiro possibilitou existência de remoção de material nessa zona, no entanto será preciso um tabuleiro com furos maiores de modo a permitir maior circulação de banho nessa zona.

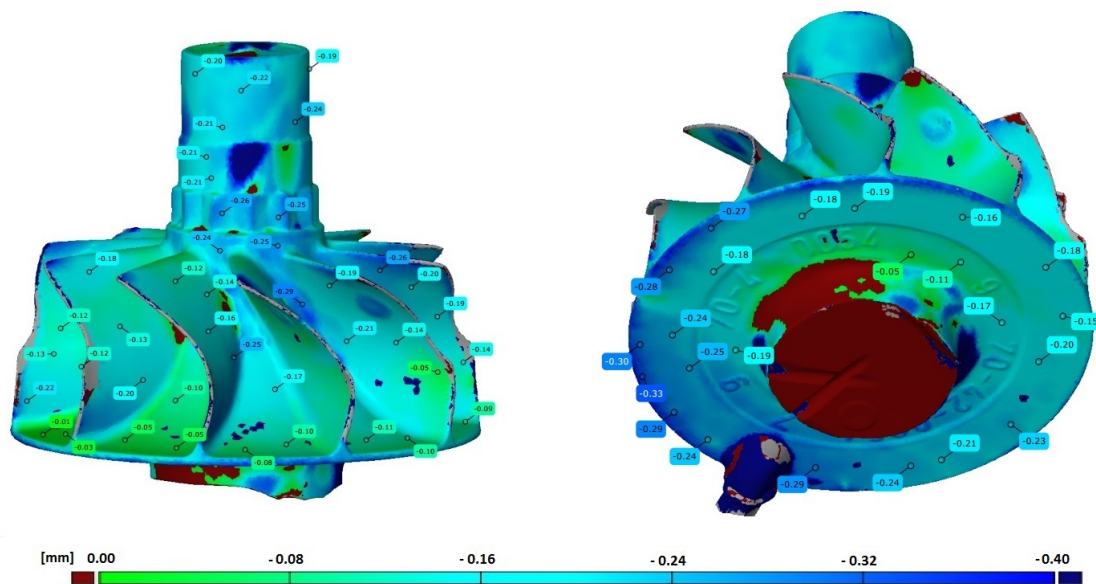


Fig. 3.33: Sobreposição das geometrias das peças não maquinada e maquinada quimicamente durante 40 minutos

Nas Figuras 3.34 e 3.35 apresentam-se a comparação entre a turbina não maquinada com as turbinas maquinadas durante 50 e 60 minutos. Relativamente à comparação com a turbina maquinada durante 50 minutos, constata-se que a remoção foi maioritariamente uniforme, havendo também um aumento de remoção face à turbina maquinada 40 minutos, como se verifica pelo aumento do tom azul em certos locais da turbina. Verificando-se também que existe uma aumento da remoção de material no bordo das alhetas relativamente à turbina anterior. O mesmo acontece com a turbina maquinada quimicamente durante 60 minutos em que se observa uma remoção maioritariamente uniforme, verificando-se também uma elevada remoção no bordo das alhetas. Tal como aconteceu para a turbina maquinada durante 40 minutos, também as maquinadas durante 50 e 60 minutos tiveram problemas de remoção na zona mais inferior da turbina, ou seja, no pescoço, indicando que é necessário implementar mudanças no tabuleiro ou desenvolver uma nova solução construtiva que resolva tal problema.

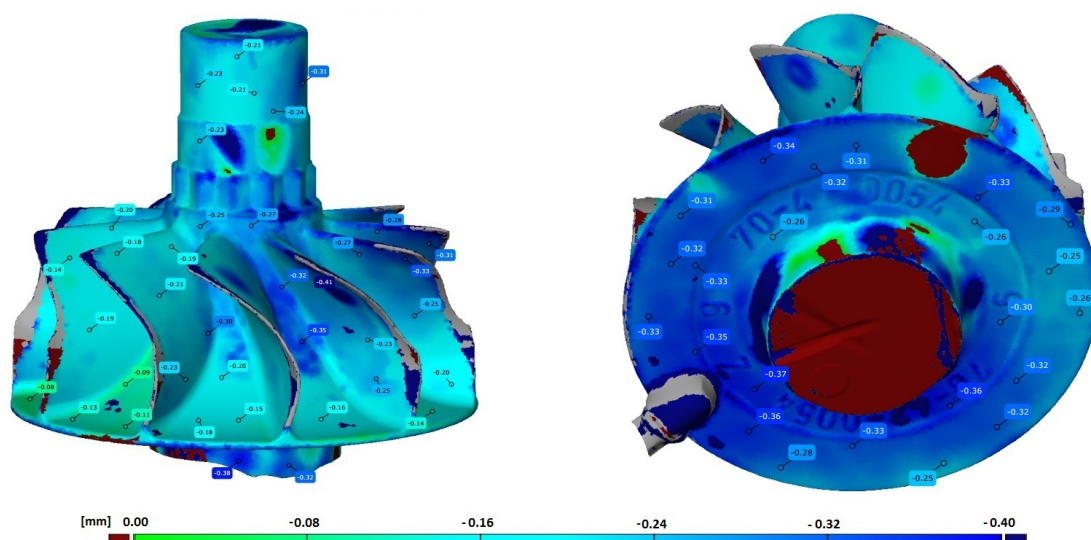


Fig. 3.34: Sobreposição das geometrias das peças não maquinada e maquinada quimicamente durante 50 minutos

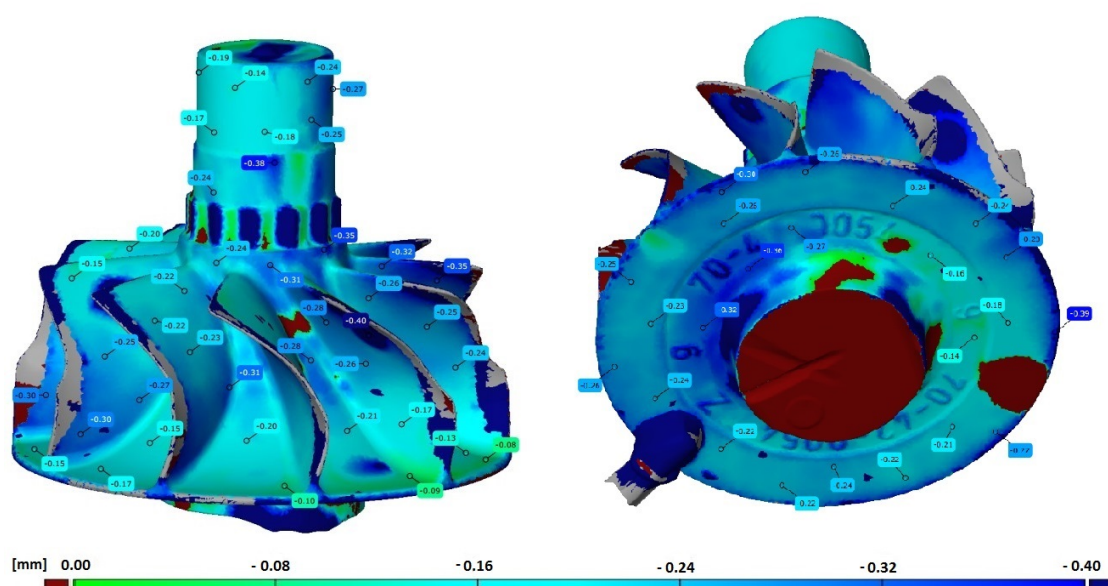


Fig. 3.35: Sobreposição das geometrias das peças não maquinada e maquinada quimicamente durante 60 minutos

Na Figura 3.36 é apresentado o controlo dimensional de uma turbina *near-net shape* vazada em carapaça com *facecoat* de ítria, maquinada quimicamente durante 40 minutos por Torres [33] e Pires [42]. Comparativamente às turbinas maquinadas quimicamente no presente trabalho, verifica-se que a realização dos ensaios com auxílio de agitação possibilitou uma remoção maioritariamente homogênea. Assim pode-se afirmar que o objetivo de obter melhores resultados a nível de uniformidade da remoção de material foi alcançado.



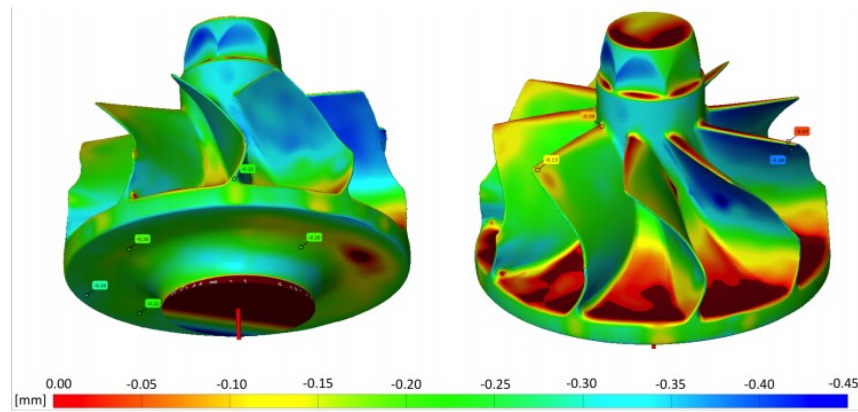


Fig. 3.36: Controlo dimensional de turbina *near-net shape* maquinada quimicamente durante 40 minutos [42]

Na Figura 3.37 encontra-se o levantamento de forma da chapa de Ti-6Al-4V colocada no banho. Através desta é possível verificar que a remoção foi uniforme na face posterior, havendo uma maior remoção na lateral da chapa, o que corrobora os resultados apresentados na Tabela 3.4.

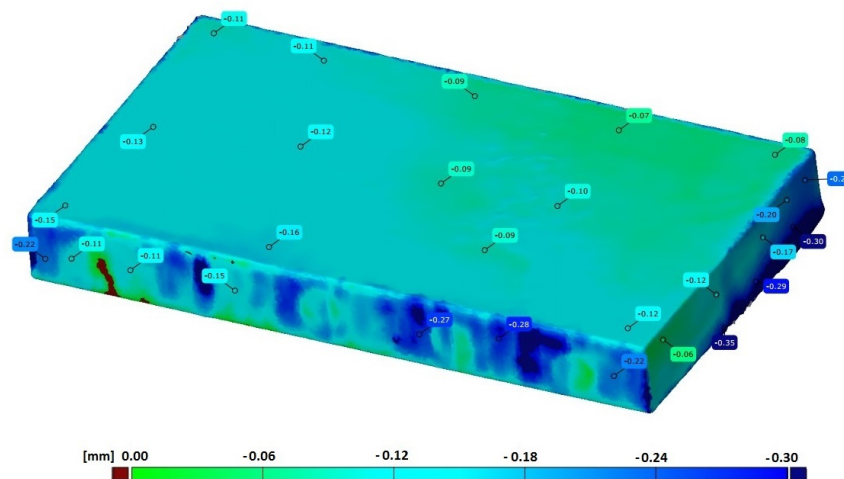


Fig. 3.37: Controlo dimensional da chapa de Ti-6Al-4V

#### 3.1.4.4 Medições de rugosidades

De modo a averiguar qual o efeito provocado pela solução utilizada na superfície das turbinas, efetuaram-se medições de rugosidade nas alhetas antes e após maquinagem química, por estas serem zonas críticas em todo o processo. Os parâmetros utilizados respeitaram a norma ISO 4287, sendo para este caso considerado apenas o parâmetro  $R_a$ , ou seja, o desvio padrão aritmético do perfil analisado, sendo dado em  $\mu m$ .

O equipamento utilizado para as medições foi o medidor de perfis *Hommelwerke* apresentado na Figura 3.38. O percurso avaliado na medição de rugosidade nas alhetas teve um comprimento 4,8 mm.

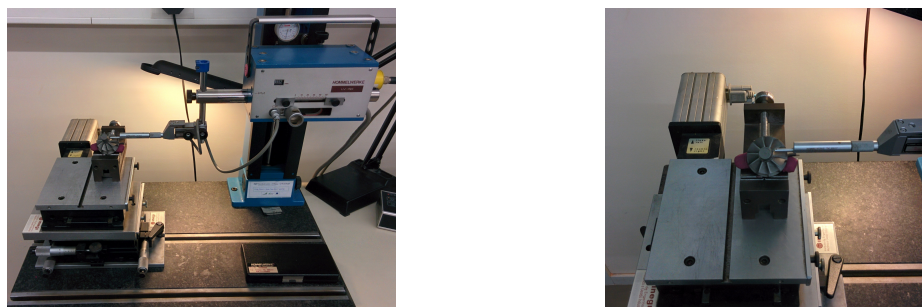


Fig. 3.38: Medidor de perfis *Hommelwerke* e medição do perfil em alheta

Na Tabela 3.5, encontram-se os valores de rugosidade medidos antes e após maquinagem química.

Tabela 3.5: Resultados das medições de rugosidade antes e após maquinagem química

Turbina	Antes MQ ( $\mu m$ )	Após MQ ( $\mu m$ )	Aumento (%)
B1	2.070	4.570	120.8
C1	2.020	3.760	86.14
B2	2.630	4.920	87.07
C2	2.030	5.650	178.3
A3	1.670	5.440	225.8
B3	1.660	4.540	173.5
C3	2.050	5.190	153.2
A4	2.410	5.310	120.3

Pode-se concluir que após maquinagem química a rugosidade de cada turbina testada aumentou. Contudo, não era esperado um aumento tão acentuado dos valores de rugosidade. No entanto, um fator que pode ter contribuído para tal aumento será a deposição da camada "branca" na superfície das turbinas. Na Figura 3.39 apresenta-se a variação do aumento da rugosidade média com o aumento da duração do processo de maquinagem química, onde se verifica que quanto maior o tempo de exposição ao banho, maior o aumento de rugosidade.

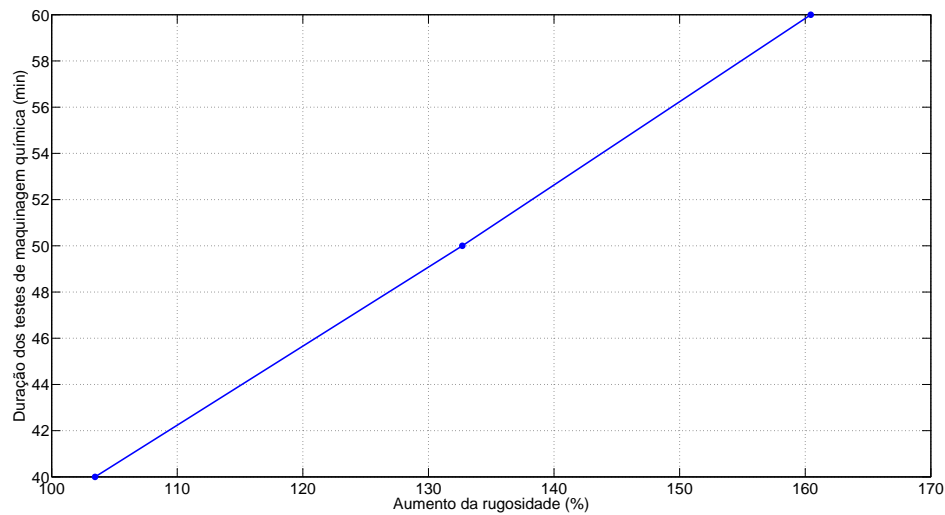


Fig. 3.39: Aumento da rugosidade média em função da duração do processo de maquinagem química

Com o intuito de não saturar o presente capítulo, colocaram-se no Anexo D os perfis de rugosidade de cada turbina antes e após a operação de maquinagem química.

#### 3.1.4.5 Análise de reatividade

A análise de reatividade foi realizada através da observação de microestruturas e da medição de microdurezas. Deste modo é possível averiguar se houve formação da camada de *alpha-case*, que segundo a literatura possui uma profundidade de cerca de 200-250  $\mu\text{m}$ . Para isso, escolheram-se turbinas de cada um dos testes descritos em 3.1.4 e uma outra não maquinada. Posteriormente realizaram-se as seguintes etapas, de modo a se poder proceder à análise de reatividade:

- Corte radial das turbinas no equipamento *Exotom* da marca *Struers*, como demonstra a Figura 3.40;



Fig. 3.40: Corte radial das turbinas para análise de reatividade

- Montagem em vácuo das amostras cortadas (Figura 3.41), envolvidas por resina epoxídica, no equipamento *Epovac* da marca *Struers*;



Fig. 3.41: Amostras montadas em resina

- Realização de desbaste e polimento nos equipamentos *Planopol 3* e *Pedemax 2* ambas da *Struers*;
- Ataque químico com o reagente *Kroll* ( 2% HF, 6%  $HNO_3$  e 92%  $H_2O$  destilada);
- Registos fotográficos através de microscópio *PMG3* da marca *Olympus*;
- Medição de microdurezas recorrendo ao microdurómetro com uma força aplicada de 100 gf. As medições foram realizadas nas alhetas e no corpo das turbinas às seguintes distâncias da superfície: 0,03 - 0,1 - 0,2 - 0,3 - 0,5 mm.

### Medição de microdurezas

Nas figuras seguintes apresentam-se os perfis de microdurezas obtidas para as turbinas *net shape* utilizadas no primeiro teste de maquinagem química. As zonas sujeitas a medições foram o corpo das turbinas e também uma das alhetas das mesmas. Para a realização de tais medições foi utilizada uma turbina "virgem", ou seja, não sujeita ao processo e uma outra maquinada durante 40 minutos.

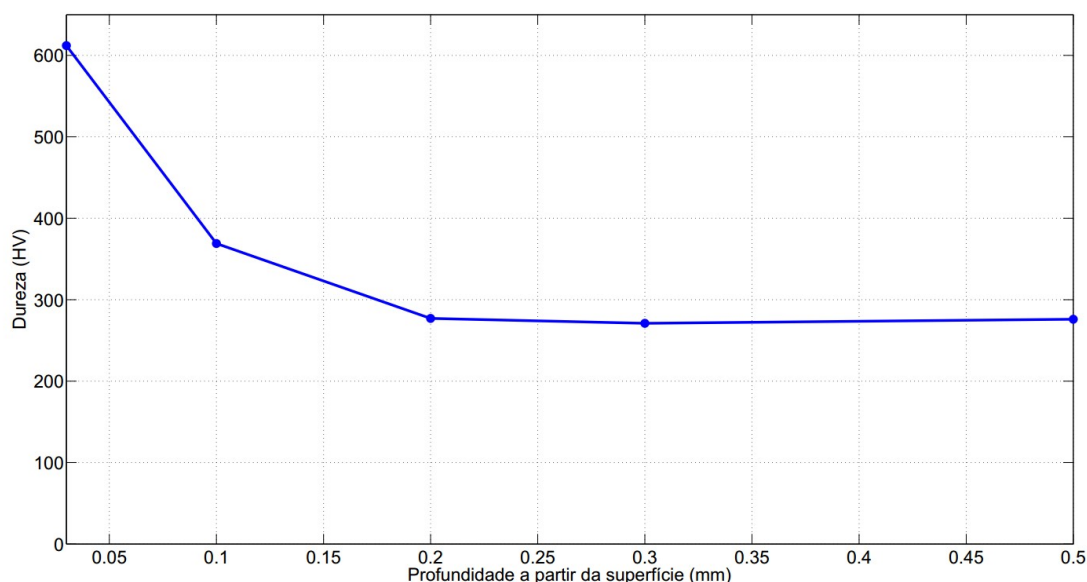


Fig. 3.42: Perfil de microdurezas no corpo da turbina virgem

Como se verifica na Figura 3.42 concluí-se que a dureza de 612 HV a 0,03 da superfície indica a presença de uma camada endurecida que se estende até cerca de 0,1 mm da periferia do corpo da alheta. Tal camada foi totalmente removida como se observa na



Figura 3.43 referente à medição de microdurezas no corpo da turbina maquinada durante 40 minutos.

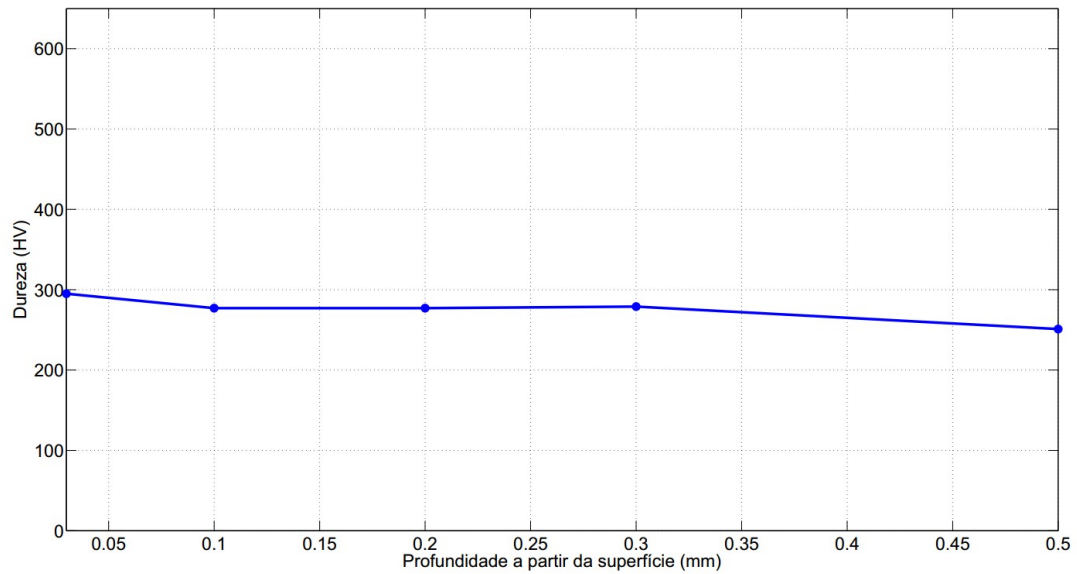


Fig. 3.43: Perfil de microdurezas no corpo da turbina maquinada quimicamente durante 40 minutos

Relativamente à medição de microdurezas na zonas das alhetas, na Figura 3.44 está patente a existência de camada endurecida sendo esta de profundidade muito reduzida, pois os valores de microdurezas estabilizam logo a 0,1 mm da periferia da alheta.

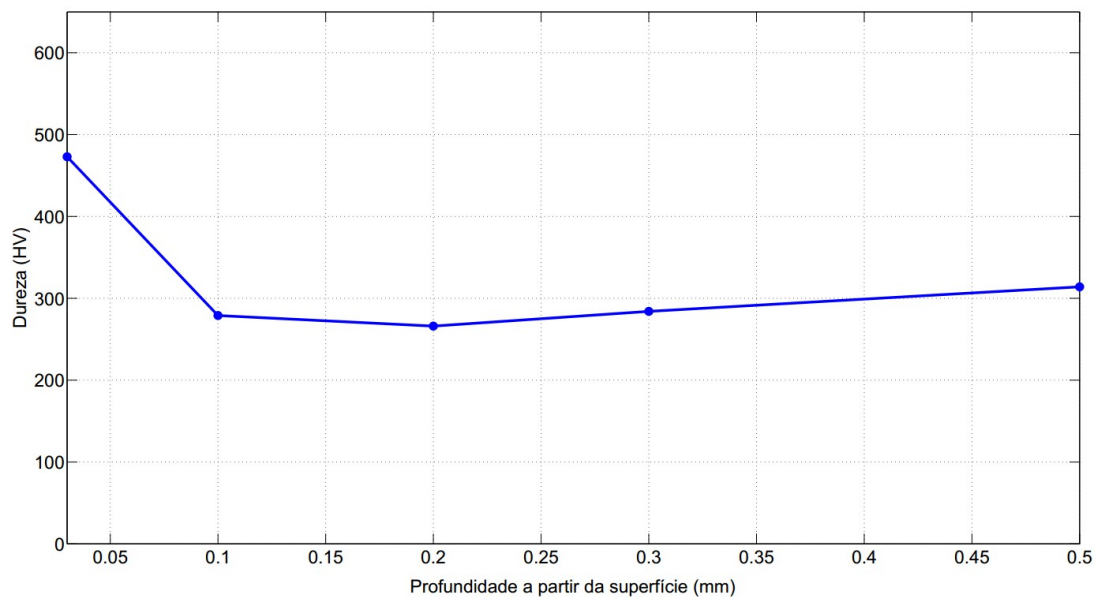


Fig. 3.44: Perfil de microdurezas na alheta da turbina virgem

Tal camada endurecida na alheta da turbina foi totalmente removida após exposição ao banho químico de 40 minutos, como se verifica na Figura 3.45. Observa-se também que existe um aumento de dureza a 0,3 mm de profundidade, isto deve-se provavelmente a essa profundidade já se encontrar perto da periferia da outra face da alheta.

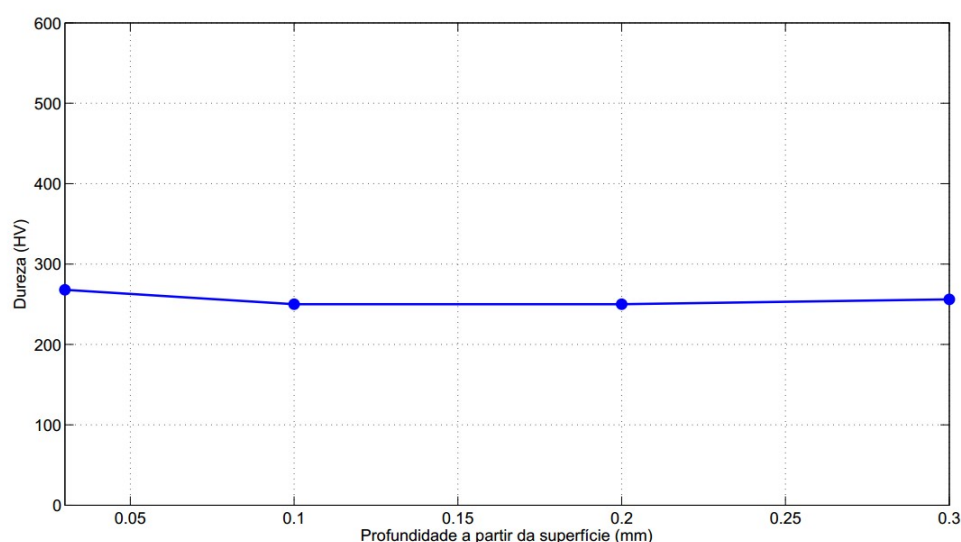
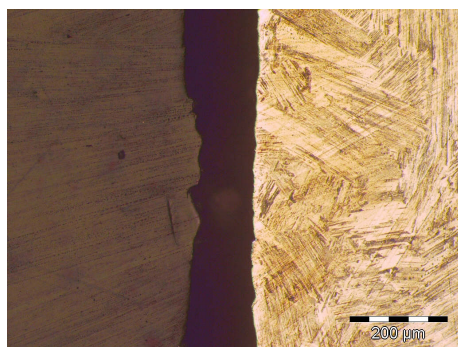


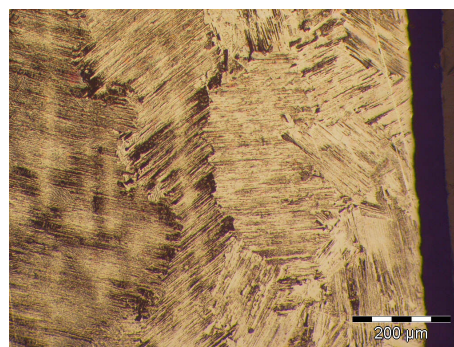
Fig. 3.45: Perfil de microdurezas na alheta da turbina maquinada quimicamente durante 40 minutos

### Análise de microestruturas

O procedimento experimental adotado baseou-se em realizar análises de microestruturas em diversas turbinas, nomeadamente uma não maquinada e as restantes originadas de cada teste realizado em 3.1.4. Para isso, analisaram-se a periferia das alhetas das várias turbinas, com o intuito de verificar a existência de camada *alpha-case*. Na Figura 3.46 apresenta-se a microestrutura de uma alheta da turbina não exposta à maquinagem química, como se verifica não há vestígios de camada *alpha-case* em termos microestruturais, embora como se verifica na Figura 3.44 existe uma camada endurecida.



(a) Superfície superior da alheta



(b) Superfície inferior da alheta

Fig. 3.46: Microestrutura de uma alheta de turbina *net shape*

Na Figura 3.47, apresentam-se as microestruturas das turbinas após maquinagem química. A partir destas, é possível concluir que não existem vestígios da camada *alpha-case*, podendo as durezas iniciais apresentadas na medição de microdurezas serem originadas por um arrefecimento mais acelerado na zona da interface metal/carapaça. É de realçar que as microestruturas das alhetas após maquinagem química não demonstram qualquer modificação relativa à reação entre metal e solução química, nem se verificam alterações entre as superfícies superior e inferior das alhetas analisadas.

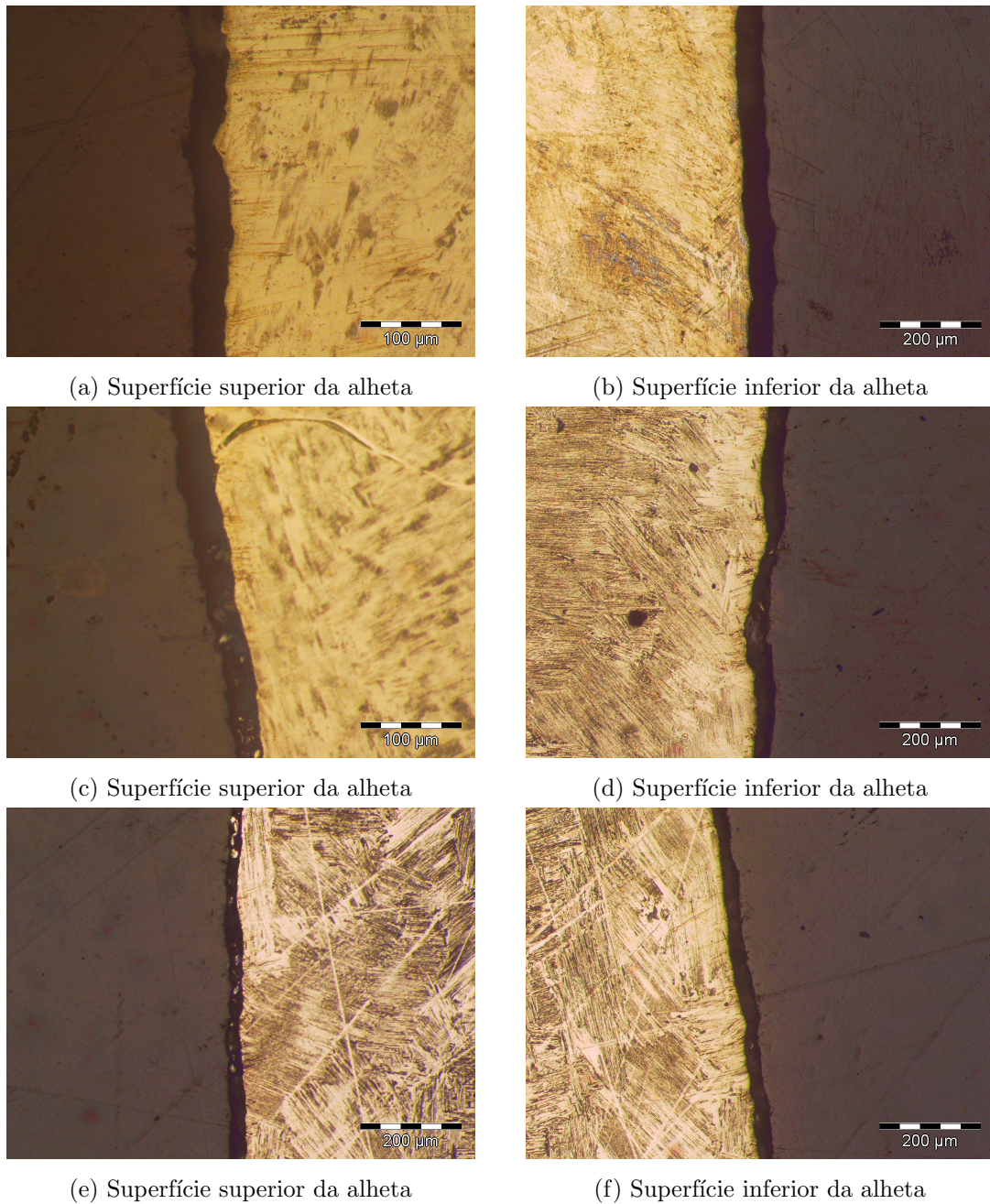


Fig. 3.47: Microestruturas das turbinas maquinadas durante a) 40, b) 40, c) 50, d) 50, e) 60 e f) 60 minutos

### 3.1.5 Ensaio com turbinas de 90 mm de diâmetro e *near-net shape*

Para a realização deste ensaio utilizaram-se dois tipos de turbinas diferentes, duas turbinas com cerca de 90 mm de diâmetro, presentes na Figura 3.48a, e duas turbinas *near-net shape*, presentes na Figura 3.48b.



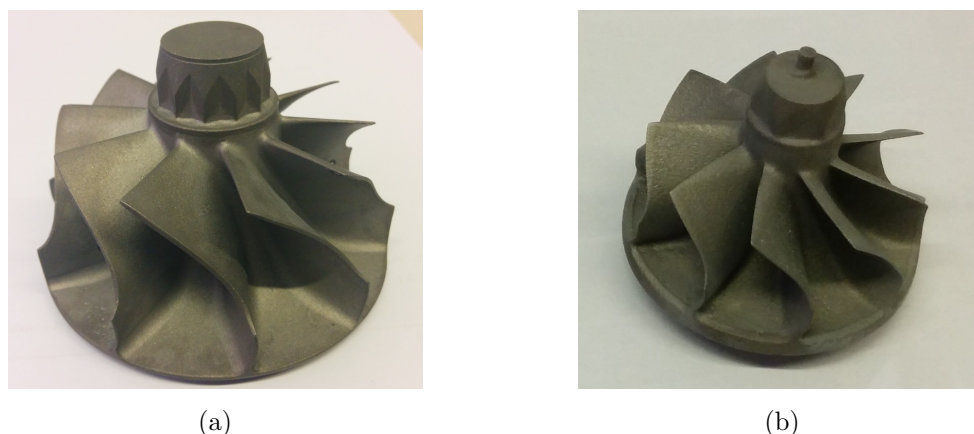


Fig. 3.48: Turbinas utilizadas neste ensaio , (a) turbina de maior diâmetro (90 mm), (b) turbina *near-net shape*

Este ensaio teve dois objetivos distintos. O primeiro objetivo do ensaio, relacionado com as turbinas de maior diâmetro (90 mm), trata-se de verificar se o processo de maquinagem química elimina inclusões cerâmicas existentes nas alhetas e base das turbinas, que se observam nas Figuras 3.49a e 3.49b. O outro objetivo prendeu-se com verificar se com um aumento de agitação do banho se verificava o surgimento da camada de  $TiO_2$ . Realizou-se também controlo dimensional de todas as turbinas assim como a sua pesagem.

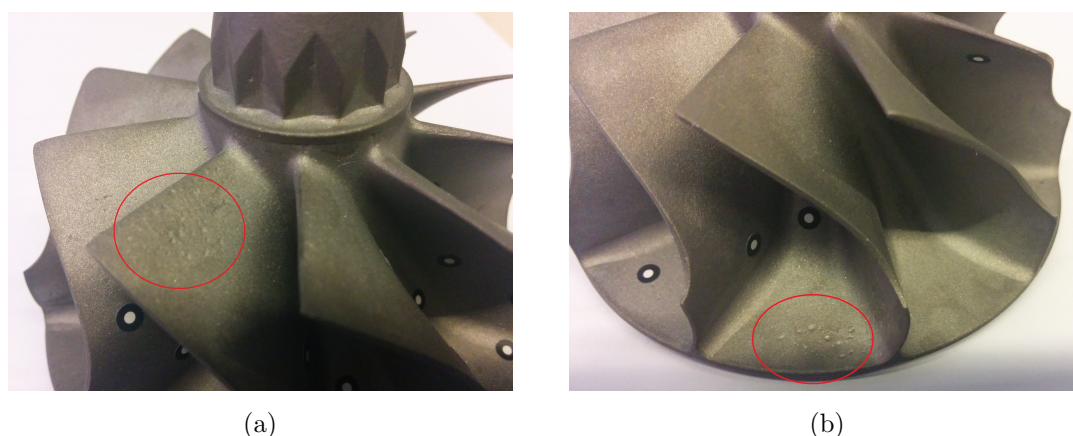


Fig. 3.49: Inclusões cerâmicas, (a) alheta, (b) base

A solução utilizada para este ensaio foi a mesma descrita em 3.1.3. Apenas variou a rotação do motor de agitação, aumentou de 290 para 1000 rpm e a temperatura do banho. Inicialmente pensou-se em realizar este teste nas condições estabelecidas em 3.1.3, ou seja, banho a 35 °C e duração do ensaio de 50 minutos. No entanto, contrariamente ao esperado, o banho encontrava-se a 43 °C. Com este aumento da temperatura do banho, decidiu-se ajustar a duração do ensaio para 40 minutos.

Posto isto colocaram-se as turbinas no tabuleiro, deixando-as no banho durante 40 minutos. Após retirar as turbinas do banho e lavá-las em água notou-se que não houve alteração da superfície das mesmas. Contudo, após secarem oxidaram rapidamente tornando-se completamente brancas. O que indica que após maquinagem química, quando em contato com a atmosfera, as turbinas oxidam adquirindo a cor branca, ou seja dá-se a formação de  $TiO_2$  na superfície das mesmas. Na Figura 3.50 encontra-se uma turbina

com a superfície ainda não totalmente oxidada. Pode-se então concluir que tal oxidação é independente da agitação utilizada.



Fig. 3.50: Turbina *near-net shape* com cerca de 42 mm de diâmetro parcialmente oxidada, (a) zonas que ainda não sofreram oxidação, (b) zona totalmente oxidada

Relativamente às turbinas de maior diâmetro (90 mm), apresentadas na figura 3.51, estas apresentam a superfície também bastante oxidada.

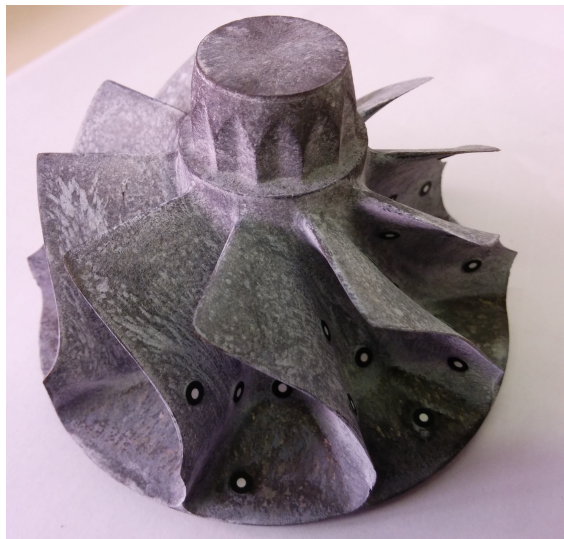


Fig. 3.51: Aspeto da turbina com 90 mm de diâmetro após MQ

De forma a visualizar melhor os defeitos existentes na superfície das turbinas de maior diâmetro (90 mm) e também verificar qual o seu aspeto, decidiu-se granalhar as mesmas. Na Figura 3.52 apresentam-se a diferença de aspeto das turbinas após maquinagem química e após granalhagem. É possível perceber que com a operação de granalhagem as turbinas ficam com uma superfície homogênea, não se verificando qualquer vestígio da camada oxidada na superfície das mesmas.

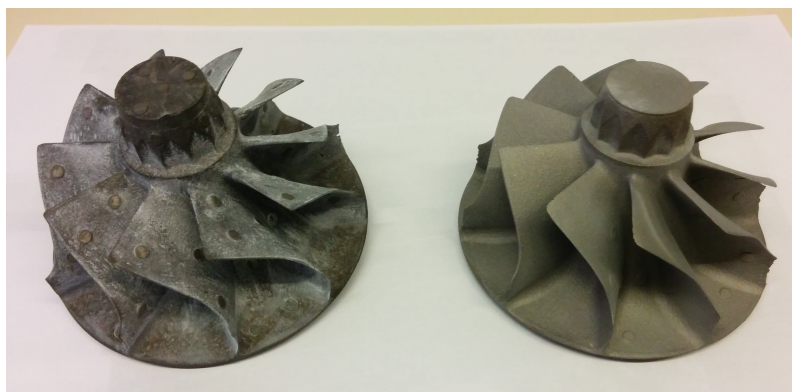


Fig. 3.52: Comparação de aspeto das turbinas após granalhagem

No que concerne aos defeitos superficiais, estes permanecem na superfície da turbina, o que indica que este processo não é eficaz para remover tais defeitos. Paralelamente, a remoção de material nas alhetas revela outros defeitos, como porosidades existentes nas mesmas, como se pode verificar na Figura 3.53. Um fator curioso deveu-se ao surgimento de "ilhas" na superfície destas turbinas, isso deve-se à permanência dos alvos utilizados para levantamento de forma na superfície das turbinas o que originou um efeito de máscara, que evitou a remoção na zona onde o alvo se encontrava colado.



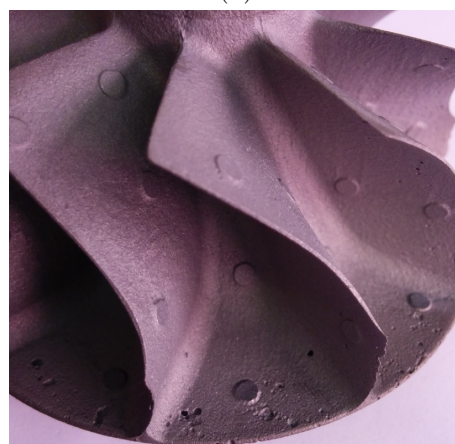
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3.53: Porosidades nas alhetas, (a) no bordo da alheta, (b) no interior e bordo da alheta



Outro problema existente neste tipo de turbinas prende-se com a remoção heterogênea na zona do bordo da alheta, como se verifica na Figura 3.9. Uma solução para esta contrariedade poderia ser a aplicação de máscaras nesta zona da turbina que impedisse a remoção de material.



Fig. 3.54: Bordo das alhetas após MQ, (a) bordo com remoção uniforme, (b) bordo com remoção heterogênea

De modo a poder identificar cada uma das turbinas maquinadas quimicamente no presente ensaio, foi designado um código a cada uma das turbinas. Para as turbinas de maior diâmetro (90 mm) foram atribuídas as designações G1 e G2. A diferença encontra-se na parte inferior de cada turbina, pois uma delas encontra-se facejada enquanto que a outra não, logo a facejada é a turbina G1 e a não facejada G2. Relativamente às turbinas *near-net shape* foram designadas por Net 1 e Net 2. Com isto é possível distingui-las e também apresentar de forma clara os resultados de medições de rugosidade e taxas de remoção de cada turbina.

No que diz respeito à rugosidade deste tipo de turbinas, pode-se afirmar que estas apresentam uma superfície bastante rugosa,  $5.32 \mu\text{m}$  a turbina G1 e  $5.62 \mu\text{m}$  a turbina G2, o que é bastante prejudicial para a aplicação mesmas. Por estas razões apontadas, pode-se concluir que esta solução química não é adequada para este tipo de turbina.

Relativamente às taxas de remoção das turbinas maquinadas, apresenta-se na Tabela 3.6 os resultados referentes à redução de peso das turbinas testadas.

Tabela 3.6: Resultados de redução de peso das turbinas de maior diâmetro (90 mm) e *near-net shape*

Código Turbina	Duração (min)	Pesagem inicial (g)	Pesagem após MQ (g)	Metal removido (g)	Metal removido (%)	Taxa de remoção (g/min)
G1	40	368.9	342.1	26.80	7.265	0.6700
G2	40	359.7	331.9	27.80	7.729	0.6950
Net1	40	63.19	56.36	6.829	10.81	0.1707
Net2	40	64.05	56.79	7.261	11.34	0.1815

É possível verificar que quer para as turbinas G1 e G2 quer para as *near-net shape* a quantidade de material removido foi semelhante. Como era esperado, as turbinas de maior

diâmetro (90 mm) tiveram maior quantidade de metal removido comparativamente com as turbinas *near-net shape*, uma vez que possuem uma área superficial bastante superior. Na Figura 3.55 apresenta-se a variação da taxa de remoção de cada turbina utilizada no presente ensaio.

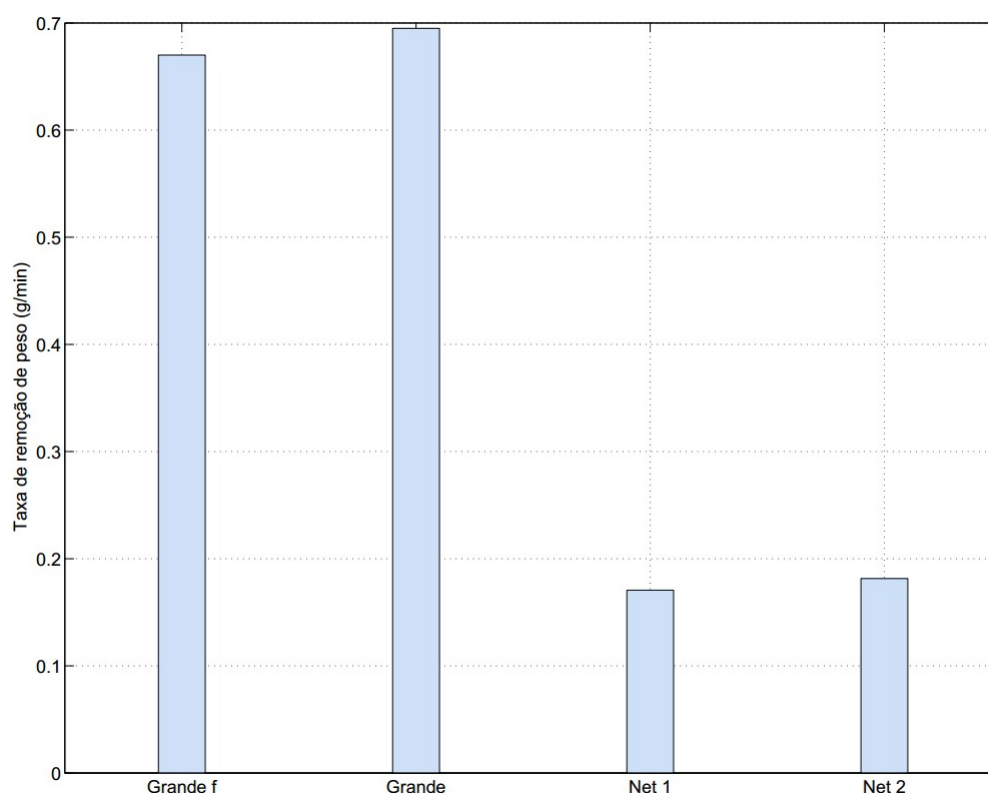


Fig. 3.55: Taxa de remoção de cada turbina utilizada no ensaio

Torres [33] e Pires [42] realizaram também testes com turbinas *near-net shape* durante 40 minutos, mas a 50 °C. No entanto, apesar desse teste ser realizado a temperaturas superiores ao ensaio descrito no presente subcapítulo, obteve piores resultados de remoção de peso, como se verifica na Figura 2.62. Isso deve-se ao fato de o volume de solução ser bastante superior e também devido à elevada agitação utilizada, o que resulta em maiores taxas de remoção.

No que concerne a taxas de redução de espessura, apresentam-se na Tabela 3.7 os resultados obtidos relativamente a este tópico.



Tabela 3.7: Resultados de redução de espessura nas turbinas G1 e G2 e *near-net shape*

Código Turbina	Secção	Espe. inicial (mm)	Espe. final (mm)	Redução espessura (mm)	Redução espessura (%)	Taxa de redução média (mm/min)
G1	Alhetas	0.8380	0.4340	0.4040	48.21	0.01205
	Tarugo	25.08	24.52	0.5600	2.233	
G2	Alhetas	0.7970	0.3970	0.4000	50.18	0.01225
	Tarugo	25.13	24.55	0.5800	2.308	
Net 1	Alhetas	0.8230	0.2490	0.5740	69.78	0.01431
	Tarugo	13.81	13.24	0.5700	4.127	
Net 2	Alhetas	0.8500	0.2840	0.5740	66.56	0.01419
	Tarugo	13.71	13.14	0.5700	4.158	

Pode-se concluir relativamente a esta Tabela que a redução de espessura foi uniforme nos dois tipos de turbinas maquinadas. Notando-se uma maior taxa de redução no que concerne às turbinas *near-net shape*, devido à menor área superficial deste tipo de turbinas, como se verifica na Figura 3.56.

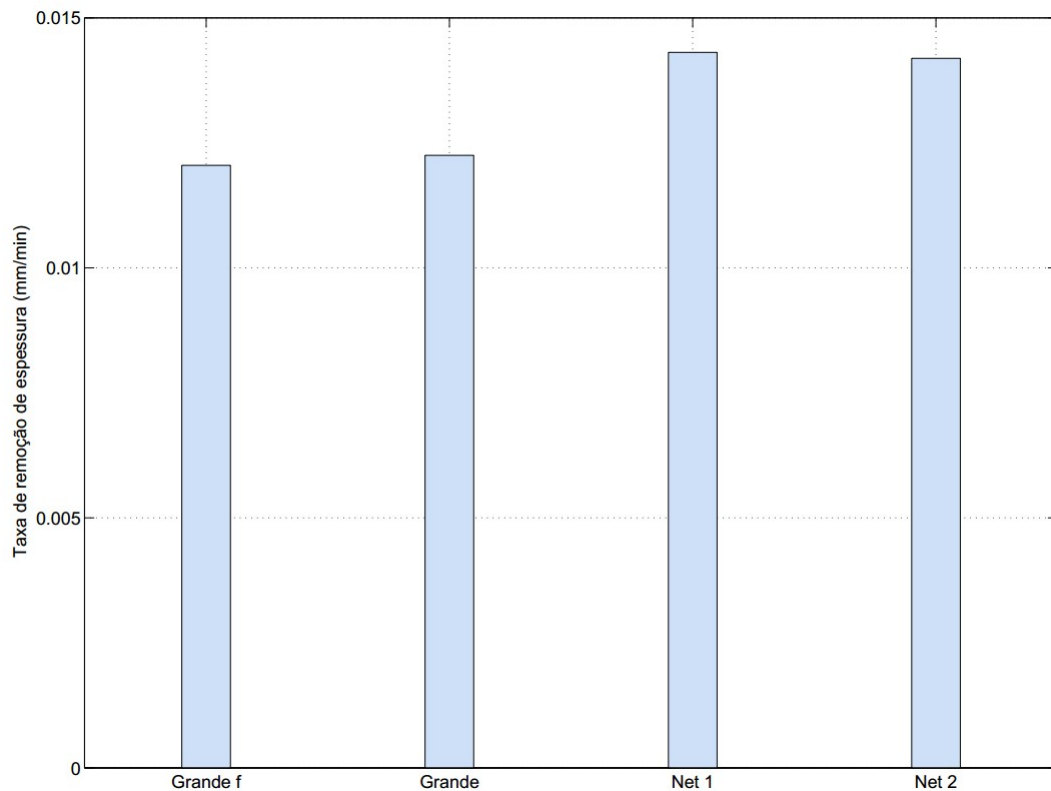


Fig. 3.56: Taxa de redução de espessura de cada turbina utilizada no ensaio

### 3.1.5.1 Controlo dimensional

Achou-se pertinente efetuar o levantamento de forma das turbinas de maior diâmetro (90 mm) uma vez que este tipo de turbina nunca tinha sido sujeito a maquinagem química e também de forma a verificar se a remoção de material foi uniforme. Como se verifica nas Figuras 3.57 e 3.58 pode-se concluir que a remoção de material foi uniforme na maioria da

superfície das turbinas. No entanto na zona da base nota-se não haver a mesma remoção. Na face inferior da base, nota-se diferenças relativamente às duas turbinas, pois enquanto que na primeira se nota uma remoção homogênea, na segunda o mesmo já não se verifica.

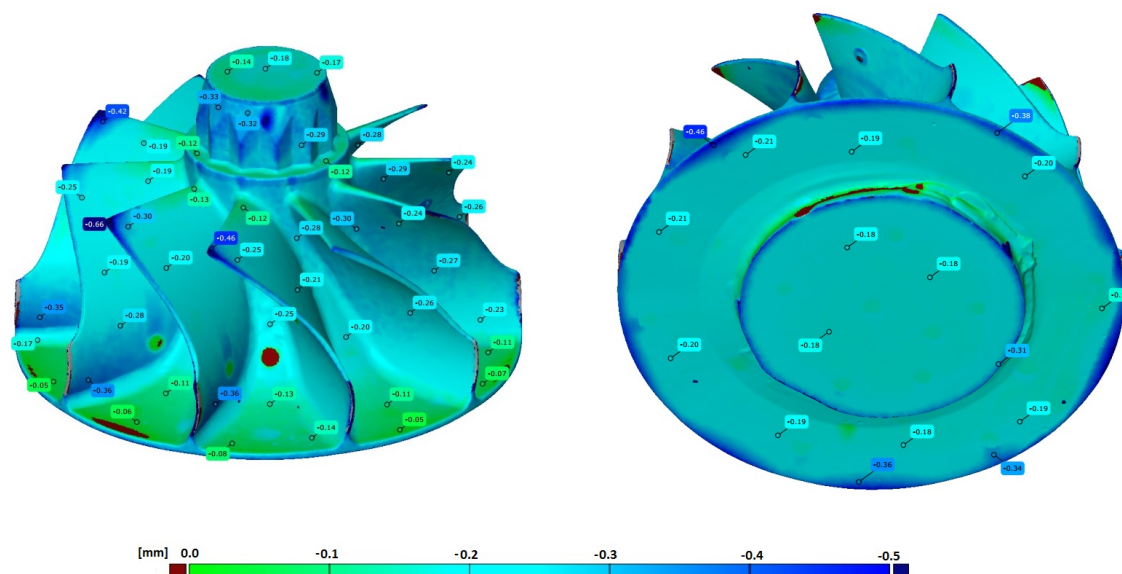


Fig. 3.57: Levantamento de forma da turbina G1

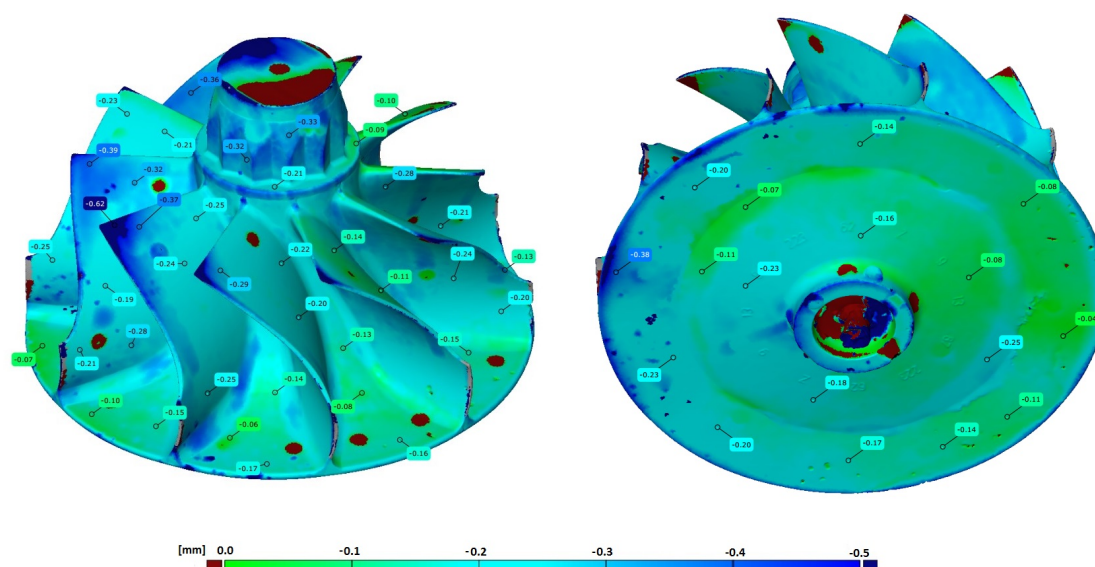


Fig. 3.58: Levantamento de forma da turbina G2

### 3.1.6 Ensaio com nova solução

Devido à solução anteriormente usada, descrita na Tabela 3.1, originar superfícies bastante rugosas, bordos das alhetas irregulares e a oxidação da superfície das turbinas, achou-se pertinente utilizar uma nova solução com intuito de verificar se tais problemas persistem. A solução utilizada foi a descrita por Chen [74], sendo apresentada na Tabela 3.8. Tal solução, designada como solução 2, é descrita pelo autor como sendo apropriada para ligas TiAl. O mesmo define a gama de temperaturas de banho a utilizar entre 38 °C e 52 °C. No entanto, como Torres [33] e Pires [42], obtiveram elevada rugosidade e baixas

taxas de remoção com o banho a 50 °C, decidiu-se utilizar esta solução a uma temperatura mais baixa, de 35 °C, de modo a obter melhores resultados. O aquecimento do banho foi realizado com um sistema igual ao demonstrado na Figura 3.21.

Tabela 3.8: Constituintes do banho utilizado por Chen para testes de maquinagem química em ligas TiAl [74]

Constituinte	Percentagem mássica (%)
Ácido Fluorídrico (HF)	2
Ácido Sulfúrico (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	4
Cloreto de Sódio (NaCl)	3.5
Água (H <sub>2</sub> O)	90.5

No Anexo apresentam-se as fichas de segurança de cada constituinte da solução acima descrita.

Para a realização deste ensaio utilizaram-se turbinas *near-net shape* de TiAl vazadas em carapaças com facecoat de ítria, apresentadas na Figura 3.59. Esta foram expostas à solução 2 durante 40 minutos. No presente ensaio a solução foi agitada periodicamente uma vez que não se possuía agitador automático.



Fig. 3.59: Turbina *near-net shape* utilizada no presente ensaio

Antes de se iniciar o processo introduziu-se titânio puro na solução, na proporção de 1g/l com o intuito de ativar a mesma. Posto isto, introduziram-se turbinas no banho. Após os 40 minutos definidos, retiraram-se as turbinas do recipiente com o banho, colocando-as em água de modo a remover qualquer vestígio da solução. Na Figura 3.60 apresenta-se o aspeto de uma das turbinas após MQ com a nova solução. Nesta é possível observar a microestrutura superficial da turbina, revelada pelo ataque químico.



Fig. 3.60: Aspeto da turbina *near-net shape* após MQ de 40 minutos

De seguida, apresentam-se na Tabela 3.9 os resultados obtidos referentes à redução de peso das turbinas maquinadas com a solução 2. Como é possível observar, ambas as turbinas sofreram uma remoção de peso uniforme, mas reduzida, como se poderá verificar em 3.1.7.

Tabela 3.9: Resultados de redução de peso das turbinas *near-net shape*

Código Turbina	Duração (min)	Pesagem inicial (g)	Pesagem após MQ (g)	Metal removido (g)	Metal removido (%)	Taxa de remoção (g/min)
1	40	64.42	60.12	4.299	6.673	0.1075
2	40	61.97	57.73	4.242	6.845	0.1061

No que concerne à redução de espessura, encontram-se na Tabela 3.10 os resultados obtidos relativamente a este parâmetro. Pode-se então constatar que tal como para a redução de peso, também a redução de espessura é uniforme em ambas as turbinas, no entanto os valores são baixos como se verifica mais à frente em 3.1.7.

Tabela 3.10: Resultados de redução de espessura das turbinas *near-net shape*

Código Turbina	Secção	Espe. inicial (mm)	Espe. final (mm)	Redução espessura (mm)	Redução espessura (%)	Taxa de redução média (mm/min)
1	Alhetas	0.8144	0.4889	0.3256	40.67	0.008319
	Tarugo	13.72	13.38	0.3400	2.405	
2	Alhetas	0.8333	0.4944	0.3389	39.97	0.008361
	Tarugo	13.72	13.39	0.3300	2.478	

### 3.1.6.1 Medições de rugosidade

Com o intuito de verificar se a inferior temperatura de banho utilizada no presente ensaio garantiu valores de rugosidade no mínimo idênticos aos observados aquando da utilização da solução 1, realizaram-se medições de rugosidade nas turbinas utilizadas. O procedimento foi o mesmo aquando das medições descritas em 3.1.4.4. Na Tabela 3.11

apresentam-se os resultados das medições de rugosidade antes e após MQ assim como a percentagem de aumento.

Tabela 3.11: Resultados das medições de rugosidade antes e após maquinagem química

Turbina	Antes MQ ( $\mu m$ )	Após MQ ( $\mu m$ )	Aumento (%)
1	3.090	3.630	17.50
2	3.370	3.850	14.20

Ao analisar os resultados das medições verifica-se que a rugosidade de ambas as turbinas aumentou, mas esse aumento não foi significativo, ou seja, a presente solução não foi demasiado agressiva para o acabamento final das turbinas submetidas a MQ. Podendo-se concluir que a utilização do banho a uma temperatura mais baixa foi vantajoso no que diz respeito à rugosidade das turbinas.

### 3.1.7 Comparação entre as duas soluções utilizadas

Como foi referido em 3.1.6 o recurso a uma nova solução prendeu-se com o fato da solução, descrita na Tabela 3.1 em 3.1.3, proporcionar a formação de uma camada oxidada nas turbinas, o que originou um aumento significativo da rugosidade das turbinas apesar de apresentar boas taxas de remoção. Deste modo, o presente capítulo tem o intuito de comparar o aspeto das amostras após o processo, assim como os resultados obtidos aquando da utilização de ambas as soluções, nos testes descritos em 3.1.4, 3.1.5 e 3.1.6.

#### 3.1.7.1 Comparação de aspeto das turbinas após maquinagem química com as diferentes soluções

Relativamente ao aspeto das turbinas após maquinagem química, foi abordado em 3.1.4 e em 3.1.5 que se formou uma camada oxidada de cor branca na superfície das amostras expostas à solução 1. No entanto, o mesmo não sucede quando se recorreu à solução 2 no ensaio descrito em 3.1.6. Podendo-se concluir que neste aspeto a melhor solução a usar consiste na da solução 2. Na Figura 3.61 encontra-se o aspeto de duas turbinas, uma maquinada quimicamente com a solução 1 e outra com a solução 2.

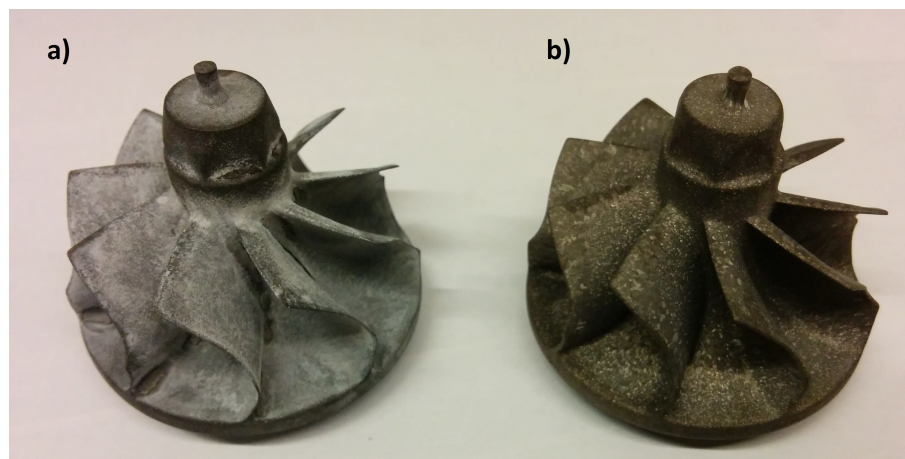


Fig. 3.61: Aspeto de turbinas *near-net shape* maquinadas com as diferentes soluções, a) solução 1, b) solução 2



### 3.1.7.2 Comparação das taxas de remoção obtidas com as diferentes soluções

No que concerne a taxas de remoção de acordo, nas Figuras 3.62 e 3.63 apresentam-se a comparação dos resultados de redução de peso e espessura entre turbinas iguais expostas às duas soluções.

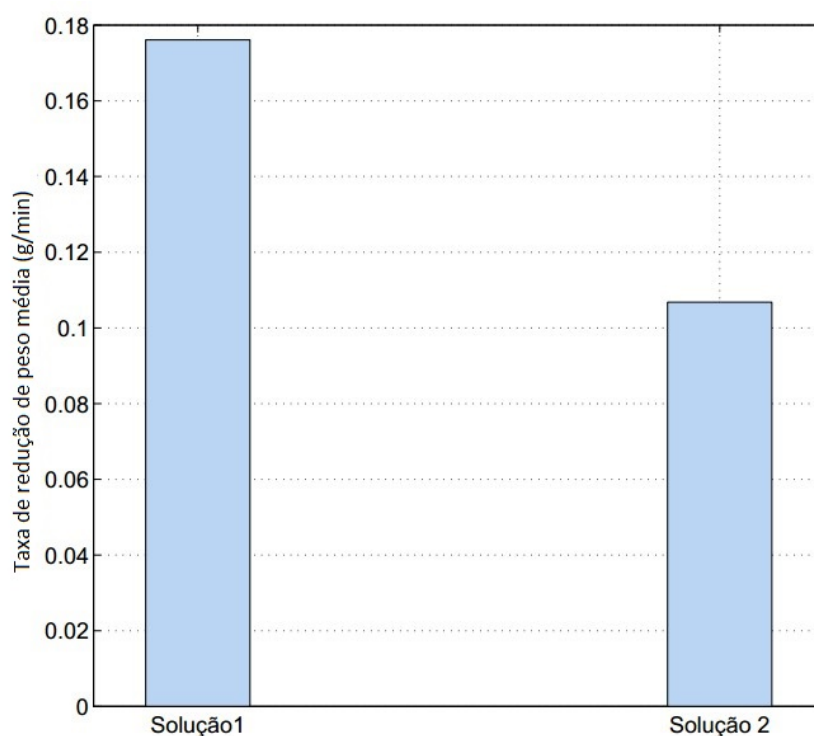


Fig. 3.62: Taxas de redução de peso média apresentadas pela solução 1 e 2

Como é possível observar, comparativamente com as turbinas *near-net shape* maquinadas quimicamente com a solução 1, no teste descrito em 3.1.5, as turbinas maquinadas com a solução 2 apresentam uma redução de peso bastante inferior. Isto deve-se à temperatura do banho ser relativamente inferior, por a solução 2 não ser tão eficaz como a solução inicialmente utilizada e também por os testes realizados com a solução 1 serem efetuados numa tina com um volume bastante superior e com agitador, o que não aconteceu no teste com a solução 2.

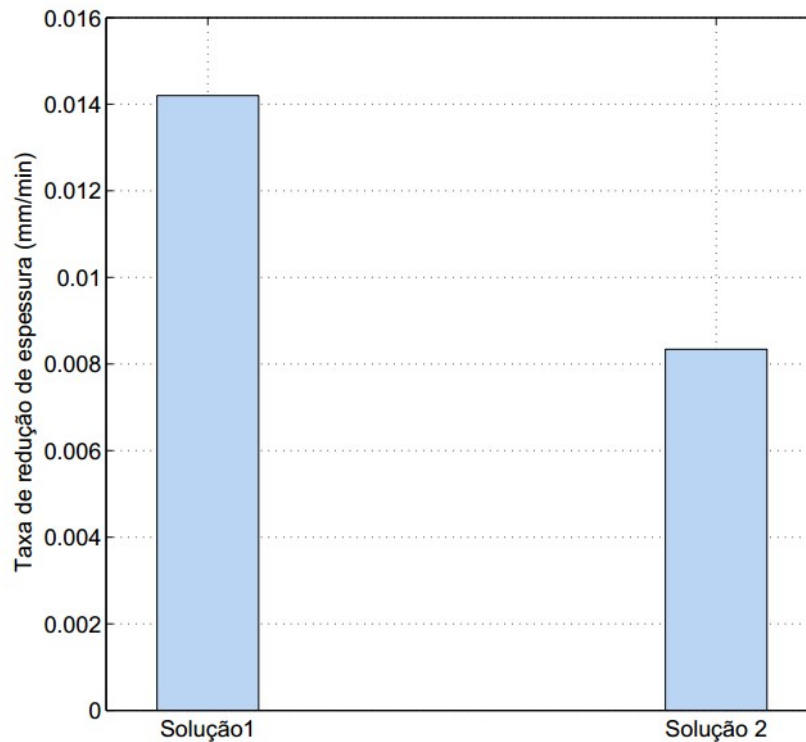


Fig. 3.63: Taxas de redução de espessura média apresentadas pela solução 1 e 2

Relativamente à redução de espessura, a taxa da solução 2 fica aquém dos valores obtidos pela solução 1. Corroborando a tese de que a presente solução apresenta taxas de remoção inferiores às observadas na solução inicialmente utilizada. Contudo, este aspeto é passível de ser contornado, com um aumento de duração da exposição das amostras ao banho.

### 3.1.7.3 Comparação das medições de rugosidade das turbinas expostas às duas soluções

No que respeita à rugosidade das turbinas após maquinagem química, observando a Tabela 3.12 e a Figura 3.64 verifica-se que houve um aumento de rugosidade bastante superior nas turbinas maquinadas com a solução 1, relativamente às maquinadas com a solução 2. Deste modo é possível concluir que a solução que apresenta superfícies mais lisas se trata da solução 2.

Tabela 3.12: Comparação dos valores de rugosidade apresentados pelas turbinas submetidas a ambas as soluções

Turbina	Antes MQ ( $\mu m$ )	Após MQ ( $\mu m$ )	Aumento (%)
Solução 1 - 1	2.070	4.570	120.8
Solução 1 - 2	2.020	3.760	86.14
Solução 2 - 1	3.090	3.630	17.50
Solução 2 - 2	3.370	3.850	14.20

Comparando os valores de rugosidade obtidos nas turbinas maquinadas com ambas as soluções, verifica-se que apenas as turbinas maquinadas quimicamente com a solução 2

se aproximam do valor ótimo requerido pelo fabricante, apresentado na Figura 2.77, no capítulo 3.1.6.1.

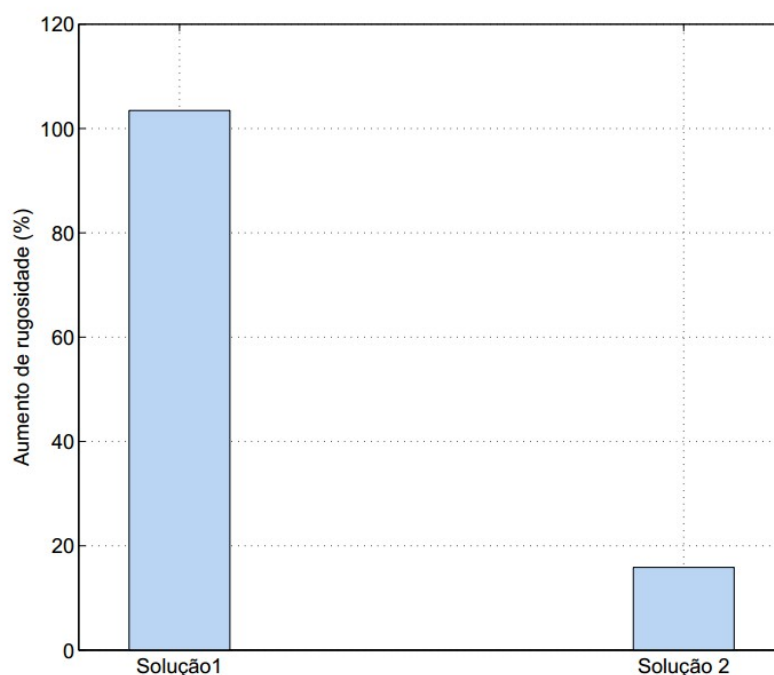


Fig. 3.64: Comparação do aumento de rugosidade das turbinas maquinadas com ambas as soluções

Em suma, após toda as comparações descritas no presente capítulo, é possível concluir que no global a melhor solução a utilizar se trata da solução 2 devido aos seguintes fatores:

- Não proporciona a formação de camada oxidada na superfície das turbinas;
- Possui taxas de remoção inferiores do que a solução 1, no entanto com o aumento de exposição ao banho este problema é resolvido;
- Turbinas após maquinagem química com esta solução apresentam valores de rugosidade inferiores aos da solução 1.

## 3.2 Projeto de moldes para pá de turbina

Sendo esta época que vivemos de crise, a poupança tornou-se algo essencial dos dias em que vivemos. É perante esta situação que leva a indústria aeronáutica, uma das mais competitivas, a investir na possível implementação de materiais mais leves no fabrico de componentes integrantes dos aviões. Essa diminuição de peso implicará uma redução do consumo de combustível e por conseguinte uma poupança enorme de dinheiro. É deste modo que atualmente se estuda a substituição das pás de turbina existentes nos andares de baixa pressão do motor de avião (Figura 2.6) em Inconel (Superliga de Níquel) por TiAl. Como tal realizou-se o projeto de dois moldes para injeção de cera. O primeiro foi projetado e concebido em estereolitografia para uma pequena série de pás com o intuito de se realizarem testes de vazamento de modo a verificar se existem problemas de enchimento na zona mais fina da pá, que se trata do bordo de fuga do perfil alar. Enquanto que o



segundo tratou-se de projetar um molde em alumínio para posteriormente maquinar, de modo a poder realizar a injeção de cera em ambiente industrial.

### 3.2.1 Projeto de molde em estereolitografia

O fabrico de uma peça por fundição de precisão implica a realização de várias etapas. Como tal a primeira etapa prende-se com o fabrico do modelo para poder criar o molde para a injeção de ceras.

Neste subcapítulo são descritos todos os procedimentos adotados para desenvolver um molde que possibilitasse a injeção de cera para obter pás de turbina.

#### 3.2.1.1 Desenvolvimento do ficheiro CAD da pá de turbina

Inicialmente foi facultado um ficheiro CAD da pá de turbina com aspeto final da mesma pronta para montagem nos andares de baixa pressão de motor de avião. A respetiva pá possuía a forma exposta na Figura 3.65.

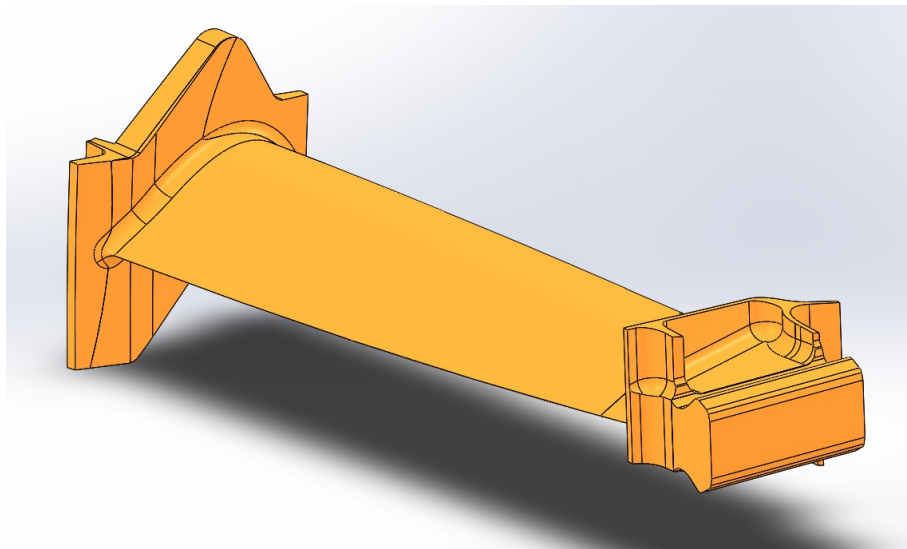


Fig. 3.65: Aspeto da pá turbina facultada para o presente trabalho

Contudo, foi alterada a base e o topo da pá de modo a simplificar a concepção do molde e também reduzir o número de cavidades, permanecendo apenas inalterável o perfil alar da turbina. Isso deve-se ao facto de se pretender realizar vazamentos com intuito de se perceber se se consegue encher totalmente o perfil alar, visto que este apresenta uma espessura bastante fina. Assim sendo, procedeu-se às alterações apresentadas na Figura 3.66.

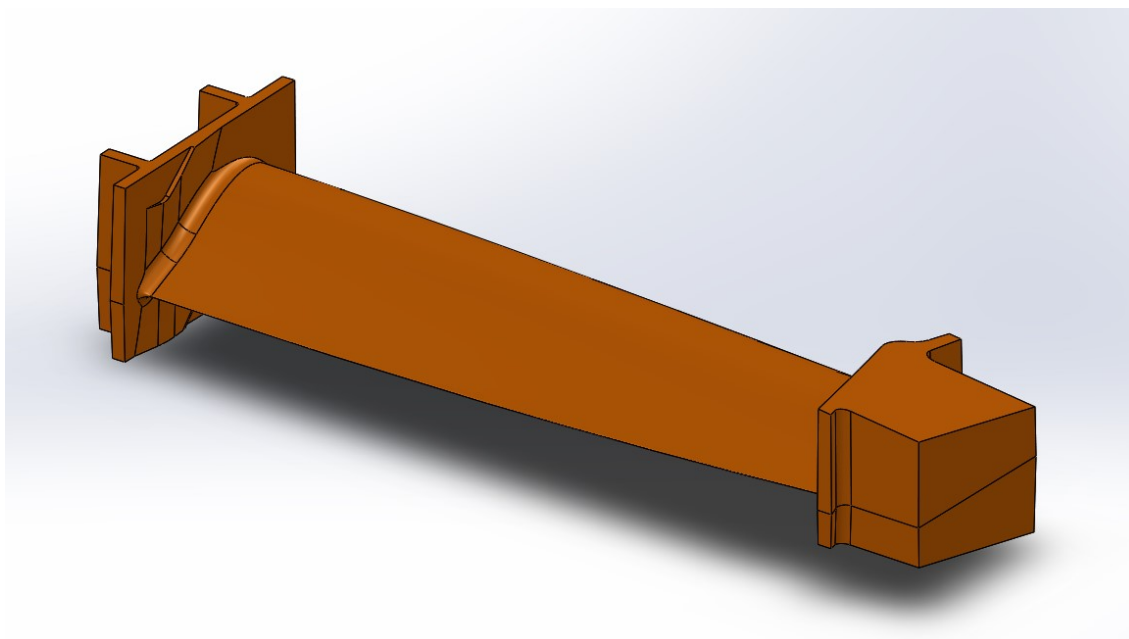


Fig. 3.66: Aspeto da pá turbina com base e topo simplificadas

Para além das simplificações introduzidas, foram inseridos ângulos de saída nas zonas críticas da peça (Figura 3.67), nomeadamente nas zonas retas, de modo a facilitar a saída da peça em cera do molde. Procedeu-se também à inclusão de sobressessuras para operações de acabamento.

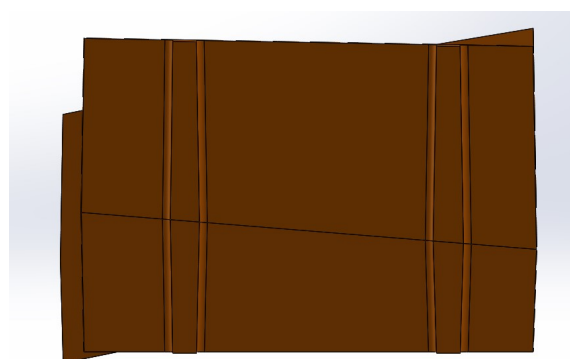


Fig. 3.67: Ângulo de saída introduzido nas secções retas da pá de turbina

Posto isto, tratou-se de contabilizar a contração da cera e do metal aquando do arrefecimento após injeção e após solidificação do metal líquido. Sabendo que para a cera utilizada no INEGI a contração ronda 1%, era necessário achar a contração do metal. Yanqing [86] desenvolveu uma fórmula em função da temperatura de fusão da liga TiAl que permite chegar a um valor de contração dessa mesma liga. Apresenta-se de seguida a respetiva fórmula:

$$s(\%) = 74.2096 + 0.09458T + 3.06575 \times 10^{-5}T^2, \quad (3.1)$$

em que  $T$  é a temperatura de fusão da liga a utilizar. Para este caso específico, foi usada uma temperatura de 1600 °C perfazendo um valor de contração do metal de cerca de 1,36 %, chegando a um total de contração de cera mais metal de 2,36%.

### 3.2.1.2 Concepção do molde em estereolitografia

Após obter o CAD modificado da pá de turbina, recorrendo ao software *Siemens NX* 8.5, procedeu-se à concepção do plano de apartação da peça de modo a poder criar as duas cavidades do molde. Na Figura 3.68a encontram-se expostas os meios moldes da pá.

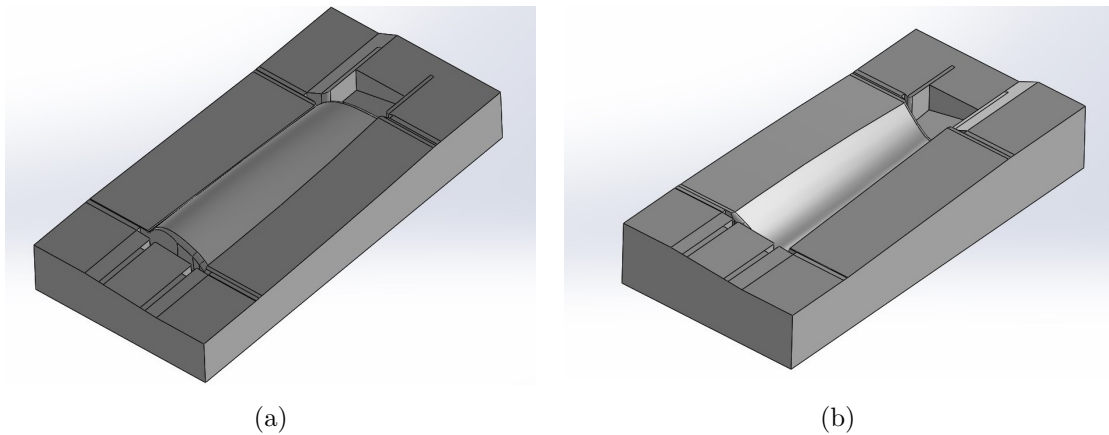


Fig. 3.68: (a) Meio molde inferior do molde, (b) Meio molde superior do molde

Foram adicionados ainda pinos cónicos de guiamento (Figura 3.69). A utilização destes em detrimento de pinos cilíndricos deve-se ao fato dos cónicos necessitarem de menos força para abrir o molde e não empenam tão facilmente como os cilíndricos. Contudo, aquando de cada desmoldagem o molde deve ser limpo com ar comprimido para que não permaneça sujidade nos furos dos pinos, pois caso contrário o molde não irá fechar totalmente como se pretende.

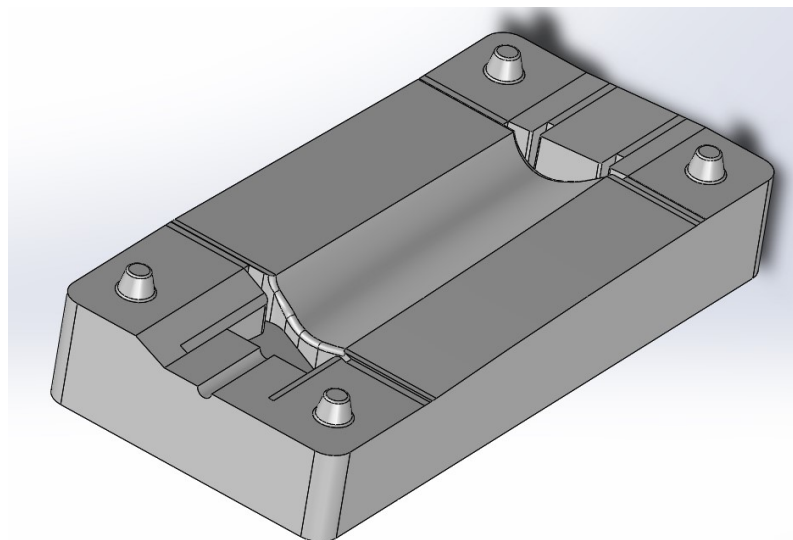


Fig. 3.69: Pinos de guiamento introduzidos no molde da pá de turbina

Foram ainda adicionados respiros ou "vents" nos vértices da peça, ou seja nas zonas críticas da mesma, de modo a garantir o enchimento total dessas zonas. Atente-se na Figura 3.70 onde se visualiza a solução descrita.

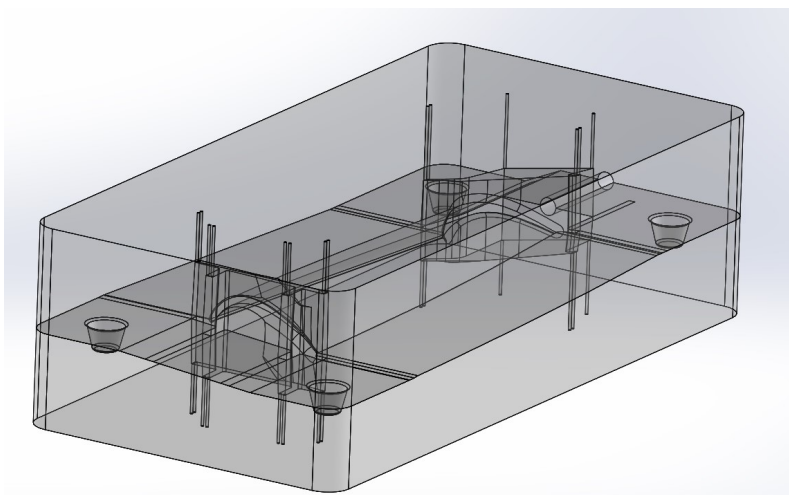


Fig. 3.70: Respiros de modo a garantir o total enchimento da pá de turbina

Introduziu-se também um canal para a entrada de cera no molde. Para isso, foi feito um furo com 7 mm de diâmetro e com comprimento desde a face posterior até ao início da zona de maior massividade da peça como se verifica na Figura 3.71.

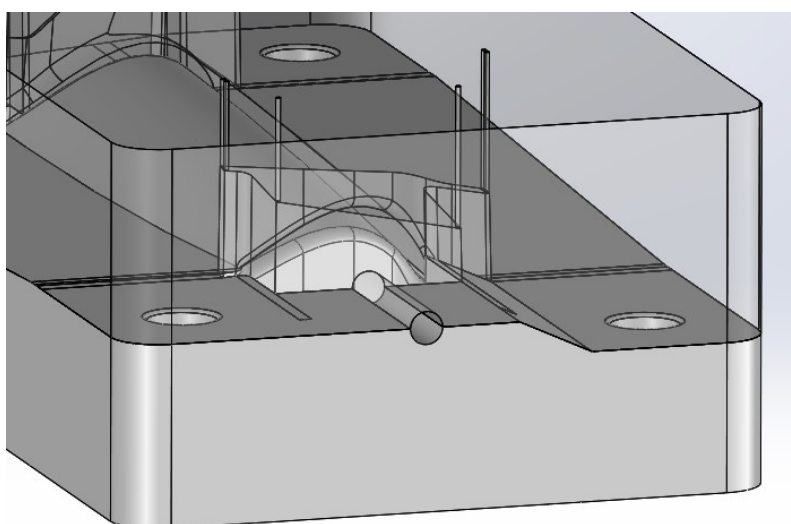


Fig. 3.71: Canal para a entrada de cera no molde

Optou-se também por realizar uma "cama", como se observa na Figura 3.72, para efetuar um molde em silicone no caso de se pretender uma série pequena de peças (10-20 reproduções). Enquanto que as cavidades demonstradas na Figura 3.68a destinam-se à concepção de um molde em estereolitografia, ou seja para um número de série de peças superior.

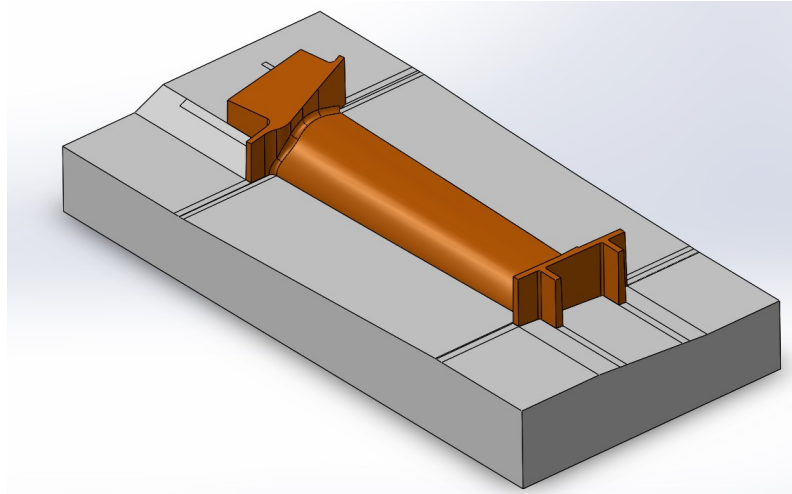


Fig. 3.72: "Cama" destinada ao fabrico de molde em resina

Para a obtenção do molde por fabrico aditivo, realizaram-se as seguintes etapas:

1. Criação do ficheiro .stl e .sli;
2. Construção do molde em estereolitografia;
3. Lavagem do molde com água;
4. Remoção dos suportes;
5. Após estar devidamente seco, o molde é colocado num forno de luz UV para pós-cura;
6. Operações de lixagem e granalhagem para remover o efeito de escada característico do processo.

Devido ao elevado preço da resina epoxídica, 200€/kg e à sua baixa condutividade térmica optou-se por fazer o molde oco, que deve ser cheio com uma resina condutora. Na Figura 3.73 encontra-se exposto o molde após conclusão do processo de estereolitografia.

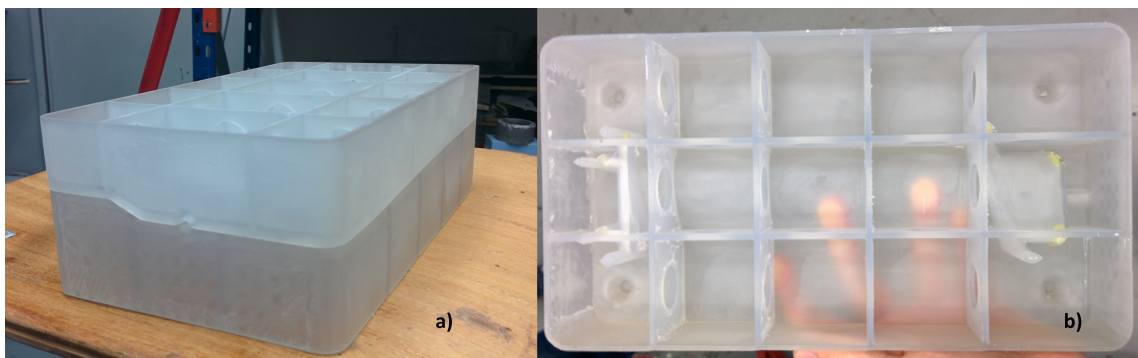


Fig. 3.73: Molde em estereolitografia

Concretizada a concepção do molde, procedeu-se ao enchimento do molde com resina de poliuretano carregada com alumínio na proporção de 1:2, em que a resina tem a proporção de 50% de catalisador e os outros 50% poliuretano, para lhe conferir rigidez, maior consistência e aumentar a sua condutividade. Na Figura 3.74 observa-se a aparência do molde após o seu preenchimento.



Fig. 3.74: Molde em estereolitografia após enchimento com resina de poliuretano carregada com alumínio

### 3.2.1.3 Injeção de pás de turbina em cera

#### Injeção manual de cera

Após o enchimento com resina, recorreu-se a um escareador para chanfrar o furo do molde de modo a que ligação entre este e o bico da máquina de injeção de cera fosse a ideal. De seguida, deu-se início ao processo de injeção de cera no molde. Na Figura 3.75 apresentam-se as etapas seguidas durante o mesmo.



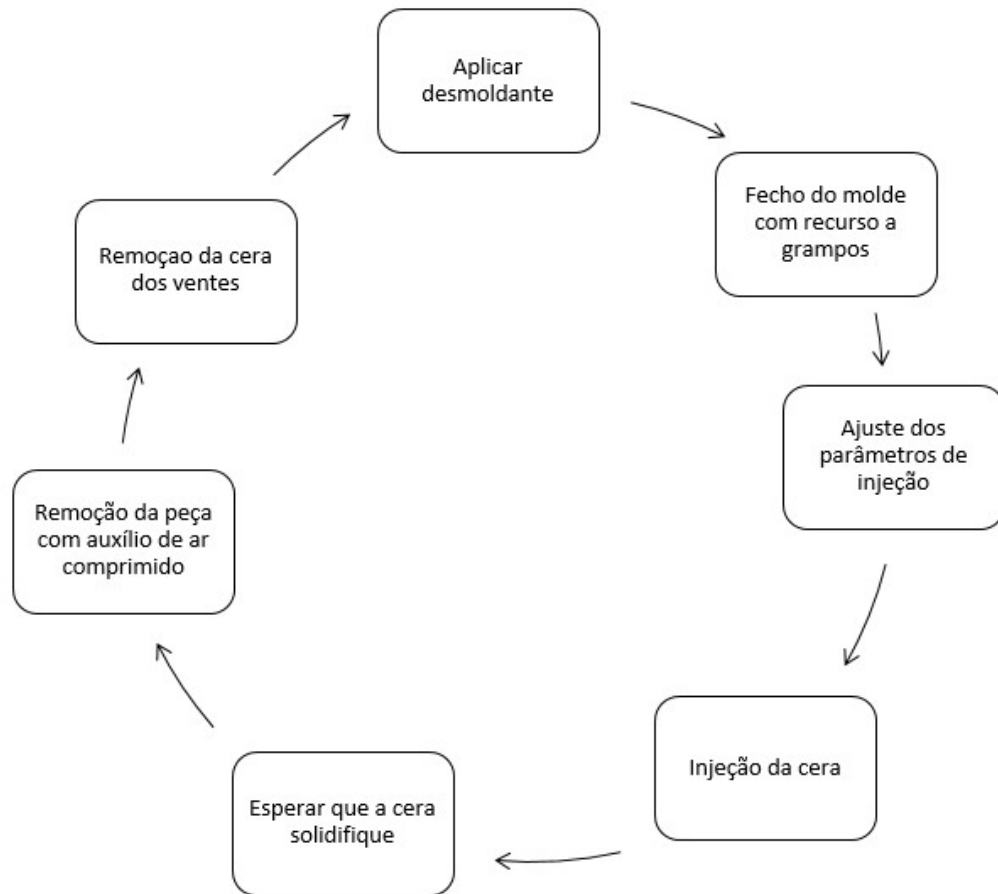


Fig. 3.75: Etapas do processo de injeção de pás de turbina

A realização da injeção de ceras foi manual. Durante o processo a pressão inicial utilizada foi de 2 bar, enquanto que a temperatura da cera foi de 69 °C. O equipamento usado para a injeção e o desmoldante, *DOMAX Silicone*, aplicado entre cada operação, estão presentes na Figura 3.76.



(a)



(b)

Fig. 3.76: (a) Cuba de injeção e (b) desmoldante *DOMAX Silicone*

Após cada injeção, deixou-se o molde arrefecer entre 10 a 15 min para se poder proceder à remoção das peças.

Contudo, a remoção da peça da cavidade inferior mostrou ser uma tarefa difícil. A



primeira pá saiu intacta mas empenada, não podendo ser dada como utilizável. As razões pelas quais não se conseguiam retirar peças deveram-se ao efeito de escada proveniente da estereolitografia, como se verifica na Figura 3.77, que causam contrassaídas dificultando ou impossibilitando a saída da peça sem que esta parta e também uma outra contrassaída originada pela modificação do CAD da pá. De modo a resolver este problema, iniciou-se a lixagem das superfícies com contrassaídas de modo a removê-las.

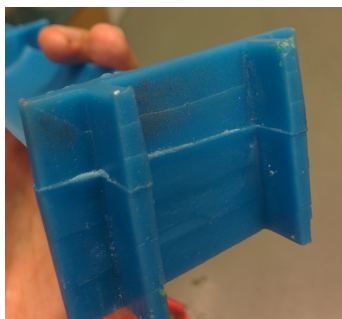


Fig. 3.77: Efeito de escada patente na pá de turbina em cera

Finalizado o processo de lixagem, procedeu-se novamente ao processo de injeção manual de cera, conseguindo-se retirar bastantes exemplares da pá de turbina. Contudo, posteriormente surgiu um contratempo, visto que muitas pás não estavam a ser enchidas totalmente no bordo de fuga da turbina, como se verifica na Figura 3.78.

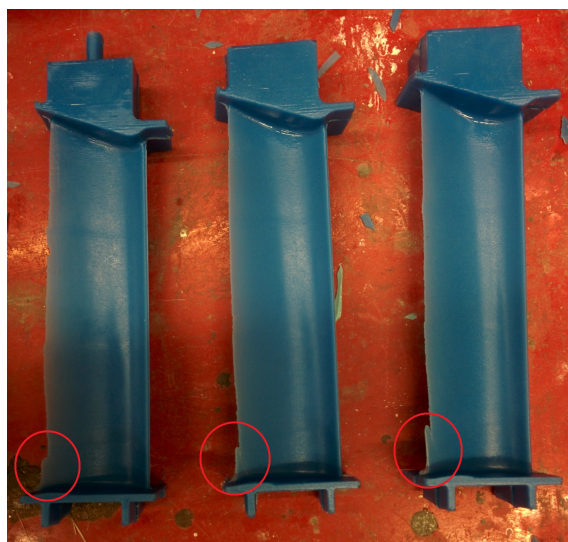


Fig. 3.78: Mau enchimento da pá na zona do bordo de fuga

Para contornar este problema, aumentou-se a pressão para 4 bar. Com esta pressão de injeção não voltaram a surgir problemas de enchimento, conseguindo-se a partir dessa alteração tirar peças de boa qualidade.

#### **Injeção de cera em ambiente industrial**

O passo seguinte consistiu em testar o molde desenvolvido em ambiente industrial. Para isso levou-se o molde à *Zollern & Comandita*, onde se procedeu à injeção de cera numa máquina injetora. Estas máquinas trabalham habitualmente com pressões na ordem dos 50 bar. Paralelamente, possuem pratos em alumínio com o intuito de refrigerar o molde após injeção, de modo a que mal acabe esta etapa se possa abrir a moldação em alumínio

e retirar a peça em cera.

Posto isto, deu-se início à preparação da máquina para se iniciar a injeção. Ao colocar o molde junto ao bico da máquina injetora individual, reparou-se que o bico existente na máquina não era apropriado para este molde e que havia um desnível entre a cota do bico e o chanfro do molde. Procedeu-se então à colocação de um bico apropriado e também à regulação da cota do mesmo de modo a que estivesse concêntrico com o molde. Posteriormente iniciou-se o processo de injeção do molde. Na Figura 3.79 apresenta-se um exemplar em cera injetado na ZCP.

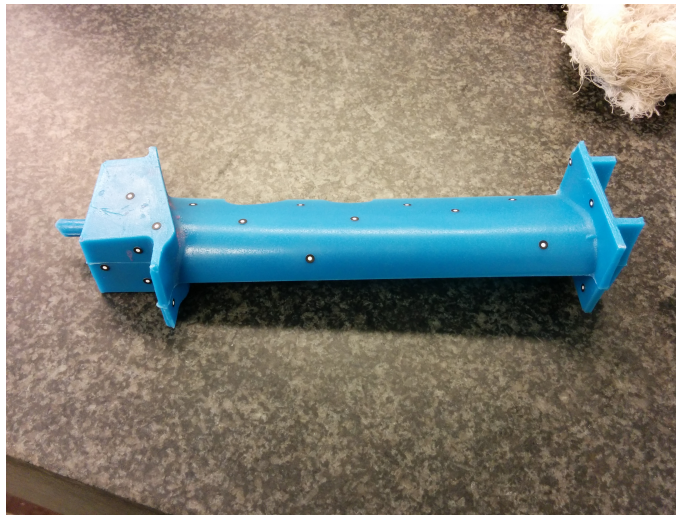


Fig. 3.79: Pá de turbina injetada com cera da ZCP

Após a realização de várias injeções de cera, chegou-se à conclusão que o molde em questão não podia ser utilizado de forma ideal em condições industriais. Os moldes utilizados na *Zollern & Comandita* são em alumínio, para que haja uma boa refrigeração do molde após injeção o que faz com que haja uma grande cadência de peças injetadas por minuto e também para que sejam leves de modo a serem fáceis de manusear. Como tal, as máquinas de injeção existentes na ZCP são adaptadas para esse tipo de moldes. Quando se coloca um molde em estereolitografia endurecido com resina carregada, este não será refrigerado do mesmo modo que um molde de alumínio, pois o coeficiente de condutibilidade térmica do alumínio é muito superior ao da solução utilizada. Isto faz com que o molde em SL tenha de arrefecer à temperatura ambiente durante cerca de 10/15 minutos de modo a poder retirar a peça em boas condições. Este lento arrefecimento é prejudicial à máquina de injeção, que habitualmente realiza várias injeções por minuto. Ao estar tanto tempo inativa, o bico arrefece e perde-se capacidade de injeção, sendo necessárias injeções intercalares para aquecer o bico.

#### 3.2.1.4 Controlo dimensional das pás

Devido às ceras utilizadas para a injeção de pás no INEGI e na ZCP serem diferentes, ou seja, a cera do INEGI contrai mais comparativamente com a da ZCP, e também para verificar a existência de empenos nas peças, decidiu-se fazer o controlo dimensional a um exemplar de cada pá em cera de modo a averiguar qual o que se aproximava mais do ficheiro CAD. No ficheiro CAD foi contabilizada a contração teórica de 1% de forma a fazer uma comparação correta. Para isso recorreu-se ao equipamento de levantamento

de forma *ATOS III Triple Scan* da *GOM* existente no INEGI, presente na Figura 3.80. Para se obter a digitalização das pás, foram colados vários pontos brancos na superfície das mesmas, para efeitos de reconhecimento do equipamento. Posto isto, foi feita uma sobreposição da geometrias do ficheiro CAD com cada pá digitalizada.

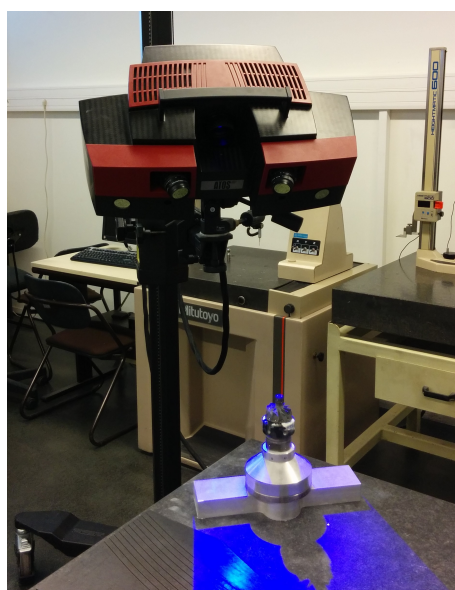


Fig. 3.80: Equipamento de levantamento de forma ATOS do INEGI

Nas Figuras 3.81 e 3.82 encontram-se as sobreposições da geometria do CAD com as pás em diferentes ceras. Em cada digitalização foi adicionada uma escala, em que a cor vermelha indica um aumento de 0,20 mm enquanto que a cor azul corresponde a uma redução de 0,20 mm em relação ao ficheiro CAD. Relativamente à primeira, referente à pá injetada na ZCP, pode-se afirmar que existe na zona central, um desvio reduzido em relação ao CAD, sendo aumentado esse desvio a partir do centro em direção ao topo e à base da turbina. Este desvio deveu-se principalmente a um ligeiro empenamento da pá ao ser retirada do molde.

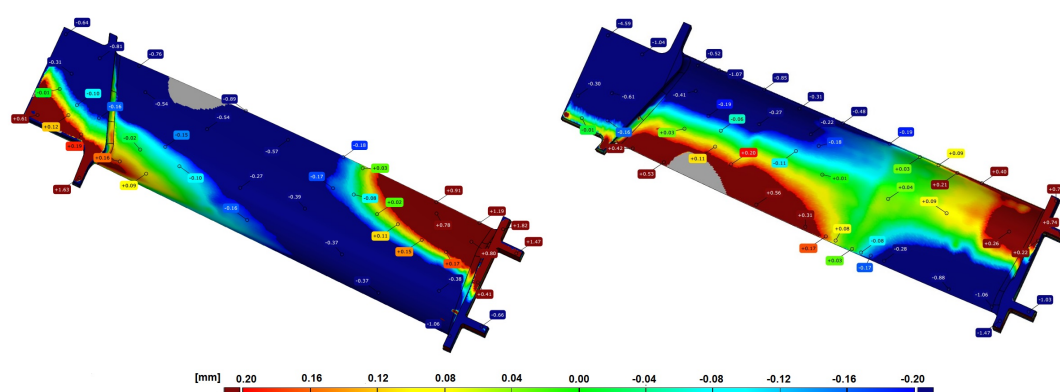


Fig. 3.81: Sobreposição da geometria do ficheiro CAD e da pá injetada com cera da ZCP

Na Figura 3.82 referente à pá injetada no INEGI, constata-se que esta possui um aspeto semelhante à anterior, em que houve também uma semelhança relativamente ao CAD na zona central da pá. Notando-se a partir dessa zona um empeno da pá, originado por excessiva força na extração da pá do molde.

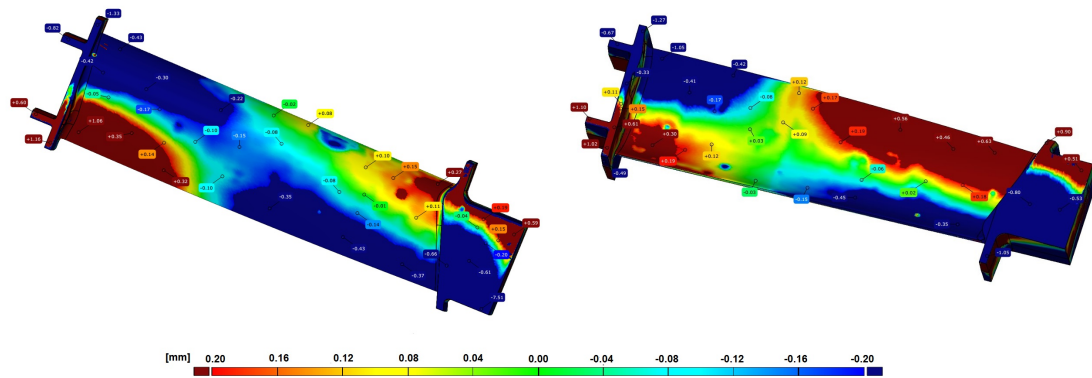


Fig. 3.82: Sobreposição da geometria do ficheiro CAD e da pá injetada com cera do INEGI

Posto isto, pode-se concluir que as peças obtidas neste molde foram de boa qualidade. No entanto para que estas fossem de qualidade superior, seria necessário injetar num molde projetado para a realização do processo de injeção de cera em ambiente industrial. Neste caso seria também necessários realizar ajustes de modo a facilitar a extração da peça de modo a evitar quebras e empenamento nas peças.

### 3.2.2 Projeto de molde em alumínio

Com o intuito de obter um molde adequado para utilização industrial, achou-se pertinente realizar o projeto de um molde em alumínio da pá de turbina. Para a realização desta etapa, o desenvolvimento do molde não poderia partir do mesmo pressuposto adotado durante o desenvolvimento do molde em estereolitografia descrito em 3.2.1. Este terá que respeitar requisitos específicos de modo a tirar o máximo partido durante a injeção industrial. Para isso o molde deve respeitar os seguintes especificações segundo a ZCP:

- A liga de alumínio a ser utilizada é a 7075, bastante empregue neste tipo de moldes;
- Meio molde inferior possuir 60 a 70 mm de altura de modo a respeitar a cota do bico da máquina;
- Guiamentos serem de coluna com casquilho;
- Distância da peça à periferia do molde de 30 a 40 mm;
- Distância de 10 mm entre a cavilha e a parede do molde;
- Cavilha desfasada 1 mm para haver apenas uma maneira de fechar o molde e também para evitar dano caso se tente fechar ao contrário;
- Canal de injeção com 6 mm de diâmetro e de 4 mm já perto da peça para ser fácil partir o canal em cera;
- Furo para ferro de extração de 8 mm;
- Chanfro de 10 mm para acoplar o bico de injeção;
- Introduzir compensação relativa à contração da cera e do metal, de 2,36% respetivamente alcançada através da equação 3.1.

Tendo em conta tais especificações iniciou-se o projeto do molde. O primeiro passo incidiu sobre qual pá utilizar, a original ou a simplificada. A escolha caiu na original, pois como a maquinagem de um molde em alumínio se trata de uma operação bastante dispendiosa, o melhor seria ter uma peça exatamente igual à que se coloca nos andares de baixa pressão dos motores de avião. Ao escolher a pá original, apresentada na Figura 3.65, não se pôde aproveitar nenhum do trabalho efetuado aquando do projeto do molde em SL.

Assim sendo, começou-se por definir o plano de apartação da peça, recorrendo ao *software* NX. Na Figura 3.83 apresenta-se o plano de apartação da pá, fulcral para a obtenção dos dois meios moldes.

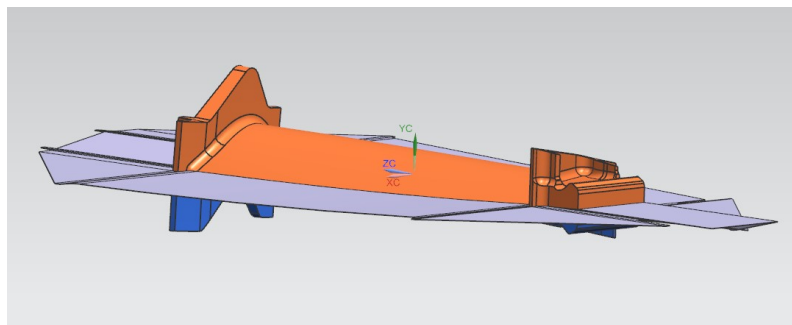


Fig. 3.83: Plano de apartação da pá de turbina

Após a obtenção do plano de apartação, é feito um negativo num bloco para dar a forma às duas meias moldações, inferior e superior presentes na Figura 3.84.

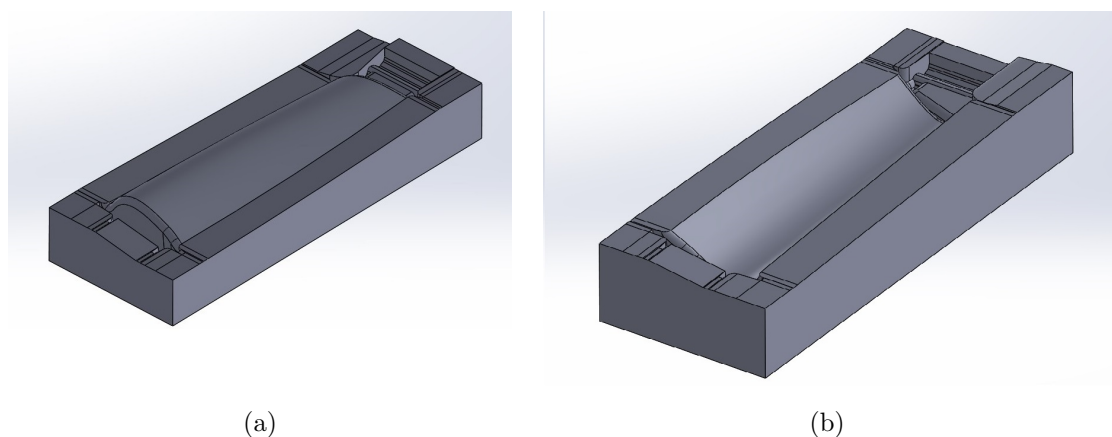


Fig. 3.84: Dois meios moldes da pá, a) inferior, b) superior

De seguida, estenderam-se as faces do molde de modo a respeitar a distância 30/40 mm da cavidade da peça à periferia do molde. Posteriormente, desenvolveu-se um movimento necessário para ajudar à extração da peça. Como se verifica na Figura 3.85 a pá de turbina possui na sua base uma cavidade, logo sem a existência de um movimento nessa zona seria impossível retirar a peça do molde.



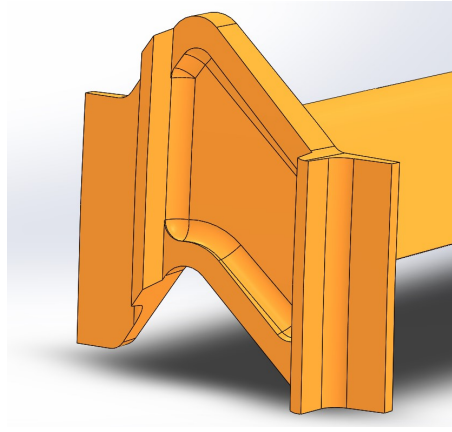


Fig. 3.85: Cavity na base da pá de turbina

O macho criado encontra-se acoplado ao meio molde inferior, deslizando em calhas de modo a se poder retirar a peça. Este, apresentado na Figura 3.86 é feito na mesma liga que o molde, de modo a oferecer as mesmas características de refrigeração.

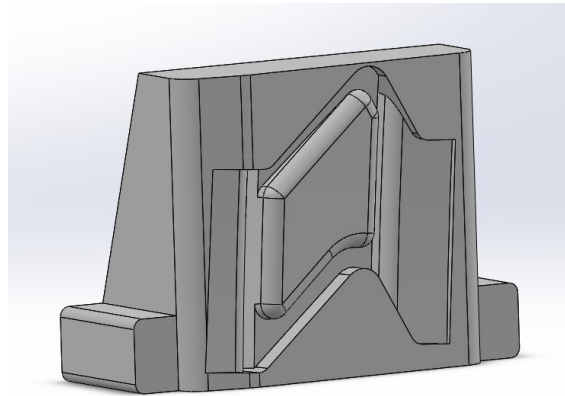


Fig. 3.86: Macho desenvolvido para auxiliar extração da pá de turbina

Relativamente às calhas, estas poderiam ser apenas maquinadas no próprio molde. No entanto, achou-se pertinente fazê-las à parte em aço de construção, por exemplo o aço da F.Ramada de norma DIN CK45 (Ficha técnica disponibilizada no Anexo E), de modo a que caso haja algum dano, estas possam ser substituídas evitando-se assim a perda de todo o molde. Na Figura 3.87 encontra-se o aspeto das calhas desenvolvidas. Estas foram aparafusadas ao molde com um parafuso DIN 912.

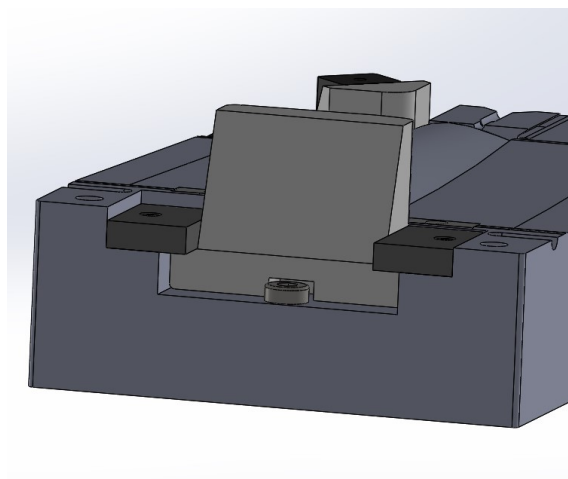


Fig. 3.87: Calha em aço de construção para permitir a movimentação que auxilia a extração da pá em cera

Como se observa na Figura 3.87 existe um parafuso na meia moldação inferior, com o intuito de fazer de batente para definir o fim de curso do macho, impedindo que este saia do molde. Enquanto que na Figura 3.88 se demonstra o movimento efetuado ao longo das calhas para a remoção da peça em cera.

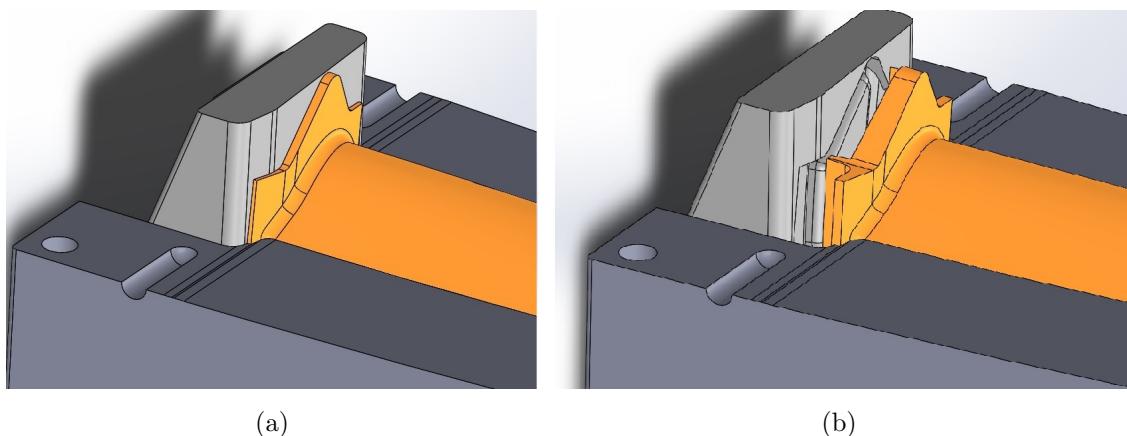


Fig. 3.88: Posições do movimento, (a) posição posterior após abertura do molde, (b) posição anterior para a remoção da peça

Com o intuito de fixar o macho na posição correta para se injetar a cera, ou seja, na posição a) referida na Figura 3.88a, introduziu-se uma cunha fixada no meio molde superior por um parafuso DIN 912. A existência desta cunha, também em aço de construção, é fulcral para garantir que as dimensões da peça estejam sempre corretas. Na Figura 3.89 apresenta-se essa solução construtiva adotada.



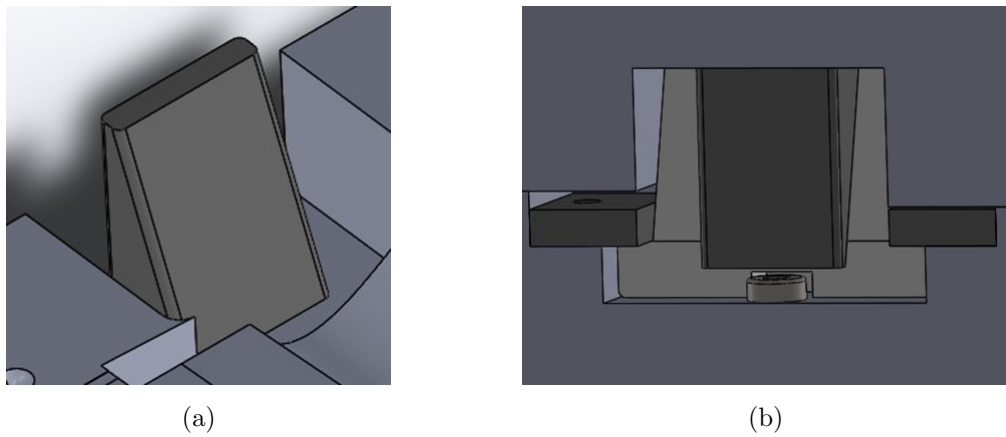


Fig. 3.89: Cunha para fixação do macho, a) aspecto do cunha, b) molde fechado com cunha a fixar o macho

Posteriormente desenvolveu-se outro macho para auxiliar a extração do topo da pá. Como se observa na Figura 3.90, o topo da turbina possui uma zona bastante fina, com 0.92 mm de espessura mais concretamente, então de modo a poder retirar essa zona facilmente sem haver o perigo de a partir ou danificar, colocou-se nessa zona um movimento.

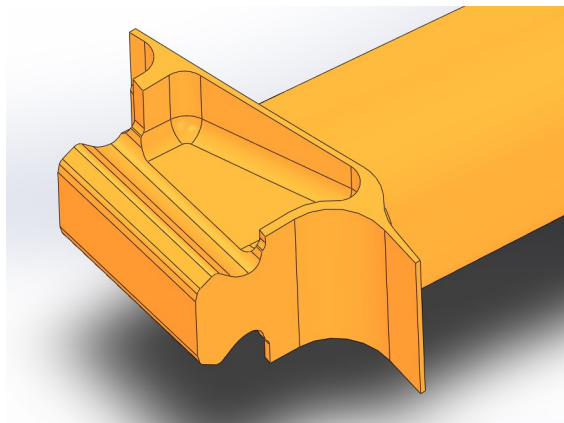


Fig. 3.90: Zona de espessura fina no topo na pá de turbina

O macho desenvolvido tem o mesmo princípio do anterior, como se atenta na Figura 3.91. Este desliza também sobre calhas, até encontrar um parafuso destinado para definir o fim de curso.

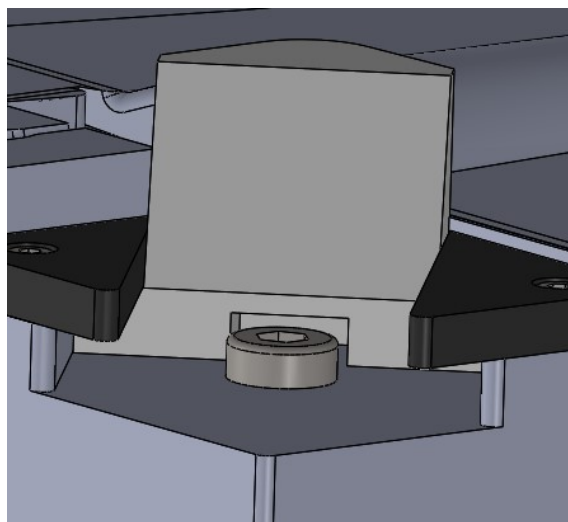


Fig. 3.91: Macho desenvolvido para auxiliar a remoção do topo da pá de turbina

Foi igualmente fixada uma cunha no meio molde superior com o objetivo de fixar o macho à posição de injeção, tal como se constata na Figura 3.92.

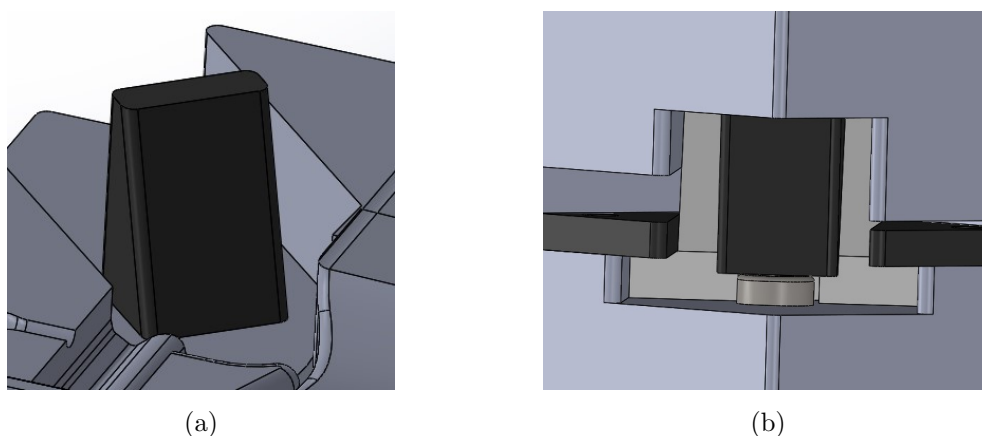


Fig. 3.92: Cunha para fixação do macho, a) aspeto do cunha, b) molde fechado com cunha a fixar o macho

Posteriormente foi efetuado o canal de enchimento, para a entrada de cera no molde. Este possui um diâmetro de 6 mm e 30 mm de comprimento, não se estendendo até à superfície da peça. Após esses 30 mm, o diâmetro do canal é reduzido para 4 mm de modo que após extração da peça, seja fácil quebrar o canal de injeção. Na Figura 3.93 apresenta-se o canal e também o aspeto da peça após injeção. Nesta mesma figura, observa-se o chanfro de 10 mm efetuado para haver um ligação adequada entre o bico da máquina de injeção e o molde. Outra opção poderia ser realizar o enchimento por "meia cana", ou seja em vez de o diâmetro do canal ser reduzido de 6 para 4 mm, nessa zona o canal era cortado a meio, ajudando também a quebra após injeção.

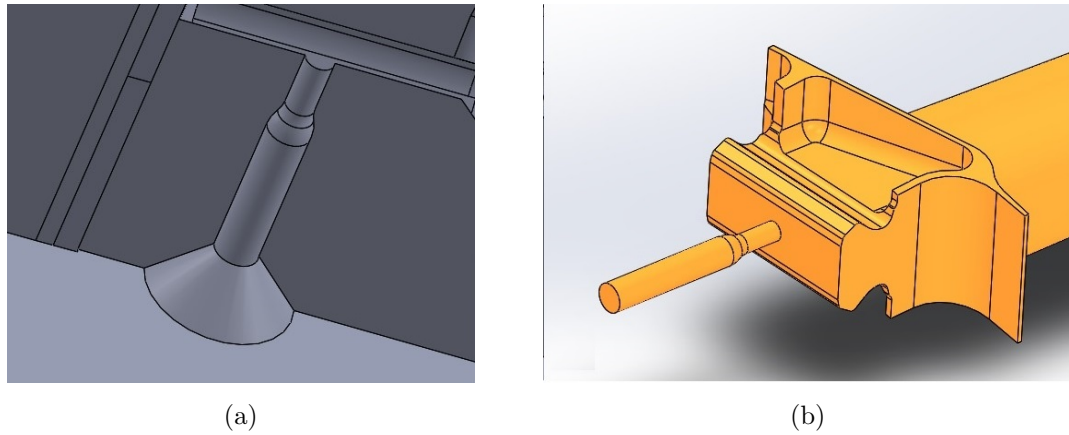


Fig. 3.93: (a) Canal de injeção no molde, (b) peça após injeção

De seguida, foram feitos furos com 8 mm de diâmetro e 30 mm de comprimento ao longo do plano de apartação com o intuito de após injeção colocar uns ferros que auxiliar a abertura do molde. Na Figura 3.94 encontra-se patente a solução construtiva adotada para auxiliar a abertura do molde. Normalmente, são utilizados dois ferros um em cada extremidade, de modo a evitar empenos. Os furos foram colocados nas zonas da base e do topo de modo a que não exista perturbações ao abrir o molde na zona crítica da pá.

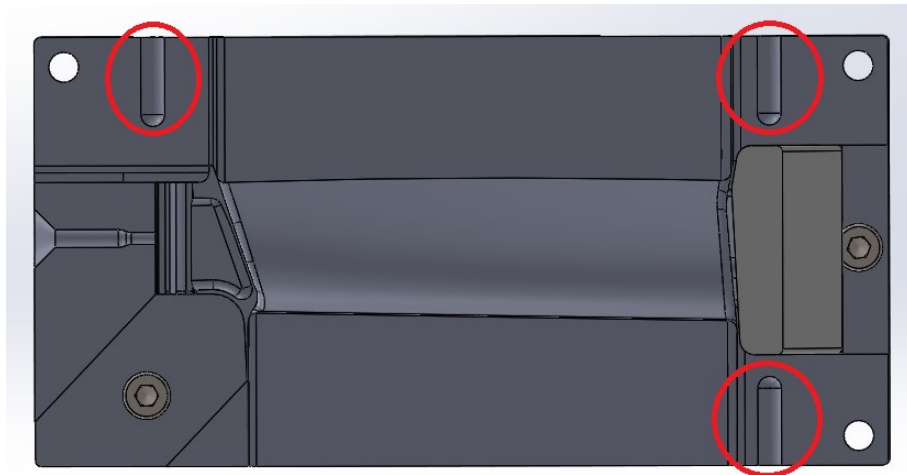


Fig. 3.94: Furos para introdução de ferros para a abertura do molde

Posteriormente, devido à existência de duas contrassaídas na base da turbina, como se verifica na Figura 3.95, foi necessário chegar a uma solução construtiva que possibilitasse a remoção da peça. A solução a que se chegou foi colocar dois machos, um em cada meio molde, ligados por pinos cónicos, que depois da injeção da peça saíam juntamente com a mesma. Estes depois serão separados, podendo retirar-se a pá injetada em cera.

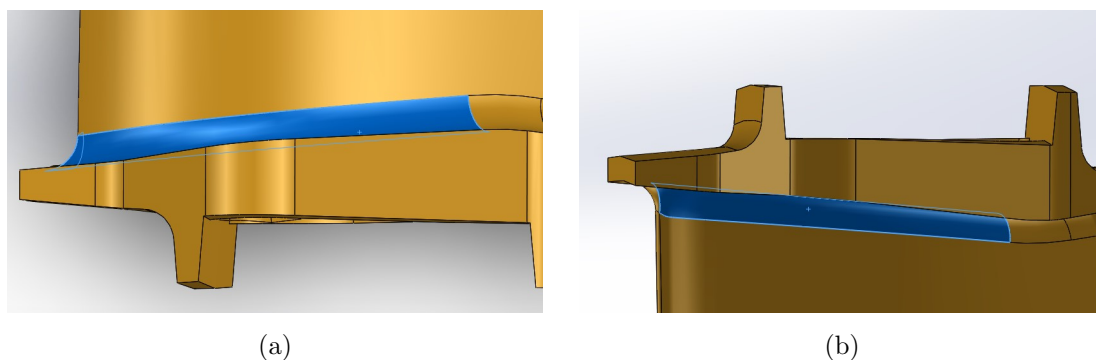


Fig. 3.95: Contrassaída na base da pá de turbina, a) parte superior, b) parte inferior

Como se pode verificar na Figura 3.96 os dois machos encaixam um no outro, estando posicionados junto à face onde existem as duas contrassaídas. Ambos possuem faces laterais inclinadas de modo a ser fácil a colocação e extração dos meios moldes.

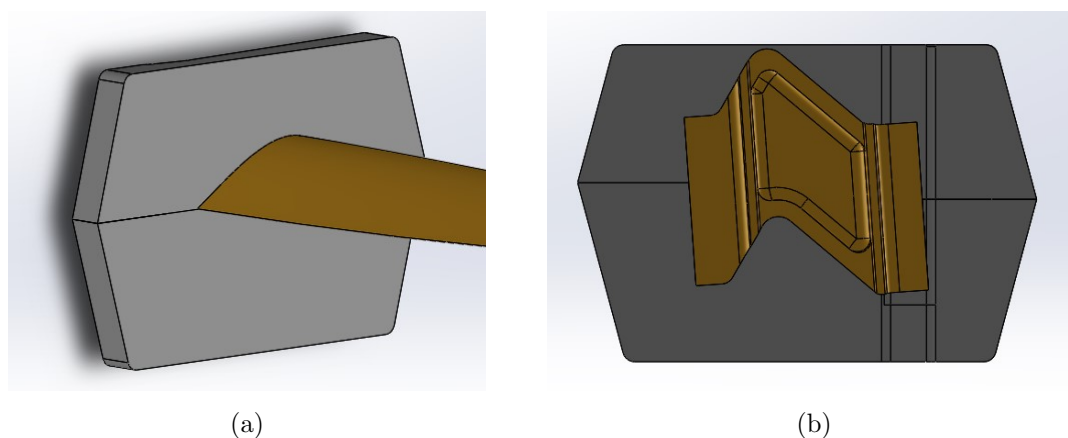


Fig. 3.96: Solução construtiva adotada para remoção da peça do molde, a) vista traseira, b) vista frontal

De seguida, foram criados os guiamentos e os casquilhos. Estes foram desenvolvidos através dos catálogos da *Hasco*, colocados no Anexo F. Os guiamentos e casquilhos escolhidos foram os Z01/10x60 e Z11/22/10 respetivamente. Na Figura 3.97 apresenta-se esses mesmos constituintes.

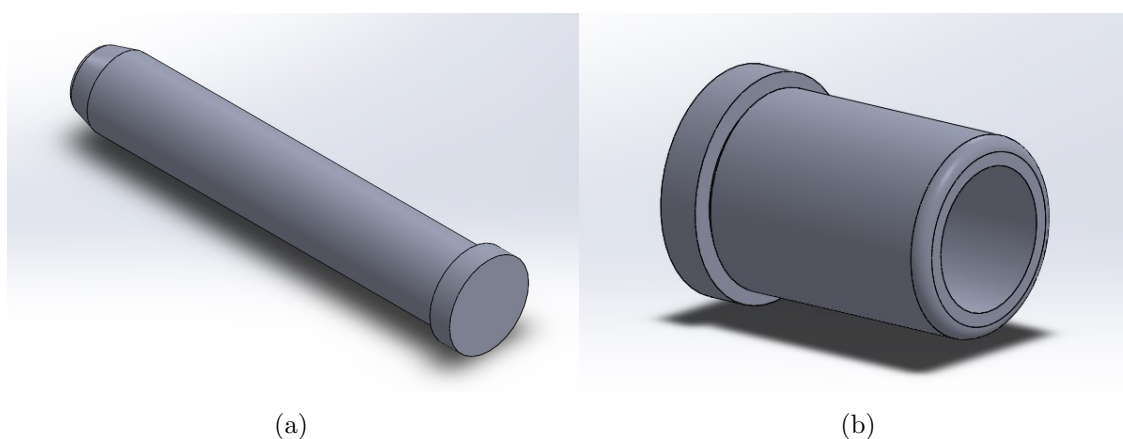


Fig. 3.97: (a) Pino *Hasco* Z01/10x60, (b) Casquilho *Hasco* Z11/22/10

Por fim, este molde poderá ser sujeito a alterações no que toca a geometria da pá de turbina, uma vez que caso não seja exequível o total enchimento da mesma após vazamento, será necessário realizar um *offset* na pá, ou seja, criar um *near-net shape* da pá de turbina que se consiga encher totalmente.

No que concerne ao custo de aquisição de um molde desta magnitude, estima-se que o seu preço rondará entre os três e os cinco mil euros, pois exige bastantes operações de maquinagem, erosão e polimento.

No Anexo G disponibilizam-se os desenhos 2D dos componentes que constituem o molde da pá em alumínio.



## Capítulo 4

# Conclusões e trabalhos futuros

Os objetivos inicialmente definidos do presente trabalho eram os de criar as condições necessárias para a realização do processo de maquinagem química para turbinas e próteses em ligas de titânio em ambiente industrial, onde se utilizaram equipamentos industriais de modo a testar uma solução, com o intuito de registrar taxas de remoção, homogeneidade da remoção, rugosidades apresentadas pelas amostras testadas e remoção da camada *alpha case*, testar uma nova solução química, projetar e concretizar a produção de um molde em estereolitografia de uma pá de turbina para injeção de cera e por fim, projetar um molde para a mesma pá em alumínio com o intuito de possibilitar a injeção de cera em condições industriais. No entanto, o procedimento experimental incidiu maioritariamente nos aluminetos de titânio, uma vez que não houve a possibilidade de realizar testes de maquinagem química com próteses. Globalmente, todos os objetivos propostos foram cumpridos, tendo sido efetuada uma pesquisa bibliográfica que sustenta os resultados alcançados, assim como revela todos os equipamentos necessários para complementar o processo de maquinagem química a nível industrial, referindo também diversas soluções que poderão ser testadas de forma a encontrar a mais apropriada para a maquinagem química de ligas de titânio. Houve também a preocupação de estender a pesquisa a outros materiais, nomeadamente o alumínio, tendo sido também referidos outros materiais comumente utilizados na indústria. Devido à falta de tempo, não foi possível testar a solução 2% HF - 4%  $H_2SO_4$  - 3.5% NaCl - 90.5%  $H_2O$  nas condições existentes na ZCP, apesar do teste rudimentar realizado no INEGI conseguiram-se registrar taxas de remoção e rugosidade das turbinas após MQ, nem efetuar um estudo sobre a necessidade de introdução de uma caldeira para aquecimento da tina existente na ZCP, uma vez que a temperatura de serviço é limitada. Posto isto conseguiram-se retirar as seguintes conclusões.

### 4.1 Conclusões

#### 4.1.1 Maquinagem química de ligas de titânio

- O limite de temperatura imposta pelas condições existentes na ZCP impôs que se utilizasse uma temperatura de banho mais baixa do que desejada (35 °C), mas que no entanto permitiu obter bons resultados no que toca a taxas de remoção, entre 0,11 e 0,13 g/min e 0,4 mm de redução de espessura na zona das alhetas para 60 minutos de maquinagem química. No que concerne à rugosidade obtida após maquinagem



química, houve um aumento em todas as turbinas sendo a rugosidade mais elevada quando maior o tempo de exposição ao banho. Os valores de rugosidade após MQ variaram entre os 3.76 e os 5.65  $\mu m$ , sendo a maioria superior a 4  $\mu m$ . Valores superiores ao esperado, devido ao surgimento de uma camada de  $TiO_2$ .

- Deposição de camada branca nas turbinas terá levado a uma inibição da reação entre a solução química e as turbinas, o que levou a uma diminuição da taxa de remoção dos 50 para os 60 minutos de exposição ao banho;
- Quantidade de camada branca depositada nas turbinas foi proporcional ao aumento da duração de exposição ao banho.
- Após ida ao SEM verificou-se que a camada desconhecida se tratava de  $TiO_2$ , sendo portanto uma oxidação da superfície das turbinas. Essa oxidação tornava-se visível quando estas estivessem em contato com a atmosfera, sendo transversal a todas as amostras expostas à solução 4.5% HF - 7.5%  $HNO_3$  - 5% *Erkantol* - 83%  $H_2O$ .
- A concepção do tabuleiro com compartimentos para posicionar as turbinas foi vantajosa como se verificou após realização de controlo dimensional, no entanto é necessário realizar um tabuleiro idêntico mas com furos de maiores dimensões para haver ainda melhores resultados na superfície inferior da base das turbinas.
- A colocação de bolas flutuantes anti-evaporação demonstrou ser bastante benéfica uma vez que as perdas por evaporação diminuíram após coberta toda a superfície do banho.
- Após controlo dimensional verificou-se que a remoção de material nas turbinas foi maioritariamente uniforme o que revelou ser uma melhoria relativamente a testes anteriormente realizados no INEGI, onde a heterogeneidade da remoção de material revelou ser um problema.
- Relativamente à análise de reatividade das turbinas, verificou-se que estas não possuíam *alpha case*, mas sim uma camada endurecida talvez devido a um rápido arrefecimento da zona de interface metal/carapaça, essa camada endurecida foi totalmente removida após 40 minutos de maquinagem química. Também nas microestruturas das turbinas não se observou qualquer vestígio da camada *alpha case*. Sendo por isso muito vantajosa a utilização de agitação do banho.
- No ensaio realizado com turbinas de maior diâmetro (90 mm) e *near-net shape*, verificou-se que para as primeiras a MQ não possibilitou a eliminação dos defeitos superficiais, como também revelou um elevado número de porosidades à superfície, assim como uma remoção irregular no bordo das alhetas, o que permitiu concluir que a MQ não é solução para a remoção de tais defeitos. No que concerne às turbinas *near-net shape*, estas apresentaram uma maior taxa de remoção comparativamente com testes realizados no INEGI com o mesmo tipo de turbina, entre 0.17 e 0.18 g/min e uma redução de espessura nas alhetas de 0,57 mm, isto devido a um maior volume de solução utilizado assim como a existência de uma elevada agitação do banho, 1000 rpm de rotação do agitador.
- Controlo dimensional das turbinas de maior diâmetro (90 mm)) revelou também uma remoção maioritariamente uniforme de material.

- A realização do teste com a solução 2% HF - 4%  $H_2SO_4$  - 3.5% NaCl - 90.5%  $H_2O$  permitiu perceber que a utilização desta solução é mais vantajosa do que a solução 4.5% HF - 7.5%  $HNO_3$  - 5% *Erkantol* - 83%  $H_2O$  uma vez que não proporciona a oxidação da superfície das turbinas e as mesmas apresentam valores inferiores de rugosidade após maquinagem química, cerca de 3  $\mu m$ . No entanto, apresenta taxas de remoção mais baixas do que a solução inicialmente utilizada, 0,10 g/min e 0.33 mm de espessura das alhetas após 40 minutos de maquinagem química. Contudo, estes valores podem ser melhorados com um aumento da temperatura, ou aumento da duração de exposição à solução.

#### 4.1.2 Projeto de moldes para pás de turbina

- Molde realizado por SL necessita de alterações de modo a haver uma fácil e rápida remoção das pás de turbina, após injeção, uma vez que existiam contrassaiadas apenas verificadas posteriormente e também devido ao efeito de escada existente devido ao processo de estereolitografia.
- Após injeção verificou-se que não houveram problemas em obter de forma perfeita a zona mais crítica da pá, o bordo de fuga.
- Pás injetadas em cera no molde realizado por SL revelaram-se ter boa qualidade, no entanto após controlo dimensional verificou-se que existem ligeiros empenos devido à difícil extração da pá do meio molde inferior.
- Molde realizado por SL revelou não ter capacidade para se realizarem injeções em ambiente industrial, uma vez que após cada injeção é necessário esperar 10/15 min que a cera arrefeça para que se possa proceder à abertura do molde. Este tempo de espera provocou problemas de arrefecimento do bico de injeção e também a diferença de cota entre o chanfro do molde e o bico, assim como a necessidade de mudar de bico de injeção, levaram a que se abandonasse a injeção de cera na ZCP nesse molde.
- Concepção do molde em alumínio possibilitará obter uma pá de turbina com o formato original.
- Molde em alumínio possui bastantes componentes de modo a poder retirar-se as pás em cera de forma simples e rápida. Este permitirá ser utilizado em condições industriais. Para isso é necessário realizar a escolha de fornecedores da liga de alumínio 7075, e posteriormente recorrer a uma empresa do ramo, por exemplo Ernesto São Simão, para realizar a maquinagem, erosão e polimento dos componentes que integram o molde. Estima-se que o custo de um molde desta complexidade custará entre três a cinco mil euros.

## 4.2 Trabalhos futuros

- Realizar estudo para introduzir uma caldeira na secção de Eletropolimento da ZCP, de forma a poder realizar testes de MQ de forma independente das operações que ocorrem no local. Tal equipamento possibilitará um estudo mais abrangente no que toca a testes com diferentes temperaturas.

- Averiguar o tipo de análises químicas a fazer às amostras recolhidas do banho existente na tina da ZCP, de forma a saber os constituintes das amostras, assim como a concentração de titânio nas mesmas.
- Realizar mais testes de modo a averiguar qual a quantidade de titânio na solução que leva a que o banho perca a sua capacidade de remover material.
- Estudar a introdução de um recuperador de ácidos, de forma a poder reciclar os ácidos usados e assim poupar no que toca à compra dos constituintes do banho, pois o que acontece é que cada vez que o banho é renovado, a solução retirado do tanque é desperdiçada, poluindo o ambiente e elevando os custos de compra de matéria prima.
- Efetuar testes com a solução 2% HF - 4%  $H_2SO_4$  - 3.5% NaCl - 90.5%  $H_2O$  na ZCP, de forma a haver uma comparação em circunstâncias iguais às utilizadas nos testes com a solução 4.5% HF - 7.5%  $HNO_3$  - 5% *Erkantol* - 83%  $H_2O$ .
- Realizar medições de microdurezas nas turbinas maquinadas quimicamente com a solução 2 e comparar esses resultados com turbinas *near-net shape* maquinadas quimicamente com a solução 1.
- Realizar estudo comparativo entre várias soluções, nomeadamente as descritas na pesquisa bibliográfica da presente dissertação, de forma a perceber qual a solução que combina as seguintes características: boas taxas de remoção, valores de rugosidade mais baixos, não oxidar as turbinas, e ser pouco poluente.
- Realizar testes de maquinagem química com próteses e também com outras ligas de titânio;
- Introduzir na tina da ZCP uma escala de volume, de modo a facilitar a colocação da quantidade de banho necessária, assim como facilitar uma verificação mais exata das perdas por evaporação.
- Colocar um transdutor de temperatura resistente aos ácidos utilizados de forma a ser mais simples saber a temperatura a que o banho se encontra.
- Adquirir um medidor de pH exclusivamente para o processo de maquinagem química de forma a controlar o poder corrosivo dos ácidos usados.
- Se houver possibilidade realizar testes de comparação entre o processo de maquinagem química e as outras variantes do processo, como maquinagem eletroquímica, remoção de *alpha case* por laser e remoção de *alpha case* por jato de água.
- Realizar vazamentos com turbinas em cera de modo a averiguar se existem problemas de mau enchimento na zona do bordo de fuga da pá. Caso hajam, estudar qual o offset a dar à pá de forma a obter a peça com a geometria exata.
- Introduzir o offset no molde em alumínio.
- Caso se pretenda continuar com a injeção de cera no molde em SL, devem-se realizar alterações, nomeadamente lixar a superfície da base de modo a remover as contrassaídas aí existentes. O ideal seria realizar tais alterações no próprio CAD e produzir uma nova moldação.

# Bibliografia

- [1] C. Leyens and M. Peters. *Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications*. Wiley, 2006.
- [2] V.A. Joshi. *Titanium Alloys: An Atlas of Structures and Fracture Features*. Taylor & Francis, 2006.
- [3] G. Lutjering and J.C. Williams. *Titanium*. Springer, 2007.
- [4] Rolls Royce. Turbofan trent engine. [http://www.rolls-royce.com/civil/products/largeaircraft/trent\\_1000/image\\_gallery/index.jsp](http://www.rolls-royce.com/civil/products/largeaircraft/trent_1000/image_gallery/index.jsp). Acedido a 2014-09-15.
- [5] Paul Hervé Tchoupe Ngnekou. *Microstructure, oxydation et propriétés mécaniques d'alliages intermétalliques à base de TiAl*. Tese de doutoramento, l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 2010.
- [6] Fritz Appel, Jonathan D. H. Paul, and Michael Oehring. *Gamma titanium aluminide alloys science technology*. Wiley-VCH Verlag & Co., Weinheim, 2011.
- [7] Toshimitsu Tetsui. Development of a tial turbocharger for passenger vehicles. *Materials Science and Engineering: A*, 329–331(0):582 – 588, 2002.
- [8] Toshimitsu Tetsui. Gamma ti aluminides for non-aerospace applications. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 4(3):243 – 248, 1999.
- [9] B. P. Bewlay, M. Weimer, T. Kelly, A. Suzuki, and P.R. Subramanian. The science, technology, and implementation of tial alloys in commercial aircraft engines. *Materials Research Society*, 1516, 2013.
- [10] GE Aviation. The genx engine. <http://www.geaviation.com/commercial/engines/genx/>. Acedido a 2015-01-08.
- [11] Variations of jet engines. <http://lyle.smu.edu/propulsion/Pages/variations.htm>. Acedido a 2014-09-15.
- [12] 3dprint. Ge considers 3d printing turbine blades for next generation boeing 777x's ge9x engines. <http://3dprint.com/11266/3d-printed-lpt-ge9x-777x/>. Acedido a 2015-01-08.
- [13] Fritz Appel and R. Wagner. Titanium aluminides. *Intermetallics*, 2001.
- [14] Kunal Kothari, Ramachandran Radhakrishnan, and Norman M. Wereley. Advances in gamma titanium aluminides and their manufacturing techniques. *Progress in Aerospace Sciences*, 55(0):1 – 16, 2012.

- [15] Kunal Kothari. *Manufacturing techniques for titanium aluminide based alloys and metal matrix composites*. Tese de doutoramento, University of Maryland, 2010.
- [16] D. M. Dimiduk. Gamma titanium aluminide alloys—an assessment within the competition of aerospace structural materials. *Materials Science and Engineering: A*, 263(2):281–288, 1999.
- [17] Sónia Luísa dos Santos Simões. *Ligação por difusão no estado sólido de aluminetos de titânio revestidos com filmes finos multicamada*. Tese de doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Dezembro 2010.
- [18] H. Clemens and W. Smarsly. Light-weight intermetallic titanium aluminides – status of research and development. *Advanced Materials Research*, 278:551 – 556, 2011.
- [19] Selector Cambridge Engineering. Ces edupack.
- [20] Bimac Corporation. Investment castings. [http://www.bimac.com/investment\\_castings\\_overview.php](http://www.bimac.com/investment_castings_overview.php). Acedido a 2014-10-22.
- [21] Sarojrani Pattnaik, D. Benny Karunakar, and P. K. Jha. Developments in investment casting process—a review. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(11):2332–2348, 2012.
- [22] Álvaro Magalhães. *Desenvolvimento do processo de fundição de turbinas para turbo-compressores em aluminetos de titânio*. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.
- [23] Ram Prasad. *Progress in Investment Castings*. Science and Technology of Casting Processes. 2012.
- [24] Metals American Society for. *Casting*, volume 4th printing of *ASM Handbook*. ASM International, 1998.
- [25] Ltd. Ningbo Castwell Industrial CO. Advantages vs disadvantages of investment castings. <http://www.castwell-castings.com/Advantages-VS-Disadvantages-78.html>. Acedido a 2014-10-24.
- [26] Inc. The International Group. Igi microcrystalline waxes. <http://www.igiwax.com/igi-products/by-type/microcrystallinewax.html>. Acedido a 2014-10-26.
- [27] Rui Neto Fernando Jorge Lino Alves, Teresa Margarida Duarte. *Protoclick! prototipagem rápida*. Protoclick, Leça do Balio, 2001.
- [28] Rapitypes. Thermojet wax pattern printer. <http://www.rapitypes.com/activities-thermojet.html>. Acedido a 2014-10-26.
- [29] Tiago Barrigana. *Estudo da reatividade das ligas de titânio e aluminetos de titânio com os refratários de carapaças cerâmicas*. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- [30] Stereolithography. <http://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>. Acedido a 2014-10-29.

- [31] Investment casting. <http://www.additive3d.com/faq/faq413.htm>. Acedido a 2014-10-29.
- [32] Solid Concepts. Id-light sla. <http://www.solidconcepts.br.com/tecnologias/id-light/id-light-sla/>. Acedido a 2014-10-29.
- [33] Francisco Torres. *Otimização do processo de obtenção de peças em aluminetos de titânio por fundição de precisão*. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014.
- [34] AlCuMet. <http://www.alcumat.com/tour/>. Acedido a 2014-10-29.
- [35] F. Tistle. The effects of polymer selection on shell performance. *13th World Conference on Investment Casting, Tokyo*, 2012.
- [36] Teresa Duarte. *Fabrico rápido de ferramentas por fundição de precisão*. Tese de doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2002.
- [37] Rui Felix. *Desenvolvimento do Fabrico de Próteses por Fundição de Precisão à Medida do Paciente*. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- [38] Sree Vinayaga Equipments. Investment casting or lost wax process equipments. <http://www.indiamart.com/sreevinayagaequipments/invest-casting.html>. Acedido a 2014-11-2.
- [39] Remet UK. Colloidal silica binders. <http://www.remet.com/uk/range/shellroom/colloidal-silica-binders/>. Acedido a 2014-11-2.
- [40] Peter Beeley. *Foundry Technology*, volume Second Edition. Butterworth-Heinemann, 2001.
- [41] John Campbell. *Castings*, volume Second Edition. Butterworth-Heinemann, 2003.
- [42] Nuno Pires. *Projeto e otimização de sistemas de alimentação e gitação para peças em aluminetos de titânio*. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014.
- [43] X. Xu, R.M. Ward, M.H. Jacobs, P.D. Lee, and M. McLean. Tree-ring formation during vacuum arc remelting of inconel 718: Part i. experimental investigation. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 33(6):1805–1815, 2002.
- [44] Bruno António Fernandes Martins. *Desenvolvimento de um forno de indução para fusão e vazamento de ligas de titânio e outras ligas reactivas*. 2008.
- [45] Masayoshi Takahashi. The investment casting technology of ti products, 2012.
- [46] Robert Guntlin. State of the art development in investment casting to face the challenges of the new generation of aero engine components, 2012.
- [47] J. Campbell. *Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design*. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2011.
- [48] John Campbell. Stop pouring, start casting. *International Journal of Metalcasting*, 2012.

- [49] Georges Broihanne and John Bannister. Using cold-crucible melting for titanium precision castings. *JOM*, 52(5):21–23, 2000.
- [50] Kwai S. Chan, Marie Koike, Benjamin W. Johnson, and Toru Okabe. Modeling of alpha-case formation and its effects on the mechanical properties of titanium alloy castings. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 39(1):171–180, 2008.
- [51] A.M Bauristhene, K Mutombo, and W.E. Stumpf. Alpha case formation mechanism in ti-6al-4v alloy investment castings using yfsz shell moulds. *Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 113(4):357–361, 2013.
- [52] Thermodynamics : Gibbs free energy. <http://www.chem.tamu.edu/class/majors/tutorialnotefiles/gibbs.htm>. Acedido a 2014-11-10.
- [53] Toshimitsu Tetsui. Manufacturing technology for gamma-tial alloy in current and future applications. *Rare Metals*, 30(1):294–299, 2011.
- [54] Yu Guilin, Li Nan, Li Yousheng, and Wang Yining. The effects of different types of investments on the alpha-case layer of titanium castings. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 97(3):157–164, 2007.
- [55] Si-Young Sung and Young-Jig Kim. Influence of al contents on alpha-case formation of ti-xal alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 415(1-2):93–98, 2006.
- [56] Ashley D. Spear and Anthony R. Ingraffea. Effect of chemical milling on low-cycle fatigue behavior of an al-mg-si alloy. *Corrosion Science*, 68(0):144–153, 2013.
- [57] D. Tomlinson and J. Wichmann. Chemical milling environmental improvements, aerospace is green and growing. *NASF SURFACE TECHNOLOGY WHITE PAPERS*, 2014.
- [58] R. T. Grah. Chemical milling of aluminum alloys: Choosing the latest technology to achieve a competitive advantage. 2002.
- [59] Metals American Society for. *Machining*, volume 16th printing of *ASM Handbook*. ASM International, 1989.
- [60] J. Arredondo, B. Colleary, S. Miskell, and B. Sweet. Chemical milling and the removal os alpha case. 2010.
- [61] Andrew Labak. Alternatives to hydrofluoric acid etching at wyman gordon company. 2010.
- [62] Honeywell. Hydrofluoric acid properties. <http://www.chem.purdue.edu/chemsafety/Equip/HFfacts10.pdf>. Acedido a 2015-01-07.
- [63] Daniel Knox. Chemical milling increasing efficiency at wyman gordon company. 2009.
- [64] Carolina Magela. Ficha de informações de segurança de produtos químicos - Ácido fluobórico 50 <http://www.quirios.com.br/Produto/PDF/ACIDO%20FLUOBORICO%2050'.pdf>. Acedido a 2014-11-27.
- [65] Floating balls to reduce evaporation. [http://www.paradisew.com/armor\\_ball\\_cover.php](http://www.paradisew.com/armor_ball_cover.php). Acedido a 2014-11-27.



- [66] Armor ball™: hollow plastic ball cover - 4 inches reinforced hollow plastic ball cover. [http://www.awtti.com/armor\\_balls\\_cover.php](http://www.awtti.com/armor_balls_cover.php). Acedido a 2014-11-24.
- [67] Inc. Mech-Chem Associates. Recycling of nitric hydrofluoric acid with diffusion dialysis. <http://www.mech-chem.com/products-and-services/acid-recovery-and-reclamation-systems/nitric-hfl-case-study.html>. Acedido a 2014-11-27.
- [68] Pure Cycle Enviromental. Diffusion dialysis acid recycling systems - features and benefits. <http://www.purecycle.com/>. Acedido a 2014-11-25.
- [69] Inc. Mech-Chem associates. Diffusion dialysis. <http://www.mech-chem.com/products-and-services/acid-recovery-and-reclamation-systems/press-release.html>. Acedido a 2014-11-28.
- [70] Inc. Mech-Chem associates. Diffusion dialysis. <http://www.mech-chem.com/products-and-services/acid-recovery-and-reclamation-systems/nitric-hfl-case-study.html>. Acedido a 2014-11-28.
- [71] Pacific Northwest Laboratory. Waste acid detoxification and reclamation. <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/p017704.pdf>. Acedido a 2014-11-25.
- [72] Wen C Say and Yu Y Tsai. Surface characterization of cast ti-6al-4v in hydrofluoric-nitric pickling solutions. *Surface and Coatings Technology*, 176(3):337–343, 2004.
- [73] K. Mutombo, P. Rossouw, and G. Govender. Chemically milled alpha-case layer from ti-6al-4v alloy investment cast. *Materials Science Forum*, 690:477–480, 2011.
- [74] Y.L. Chen. Chemical milling of titanium, 1990. US Patent 4,900,398.
- [75] O. Çakır. Chemical etching of aluminium. *Journal of Materials Processing Technology*, 199(1-3):337 – 340, 2008.
- [76] Medição de rugosidades. <http://www1.ipq.pt/PT/Metrologia/Documents/Folhetos/Fol%20RUG.pdf>. Acedido a 2015-01-02.
- [77] Rugosímetro. <http://www.metrology-direct.com/Lib/Docs/Brochures/Surface-Roughness-Parameters.pdf>. Acedido a 2015-01-02.
- [78] Zollern. Zollern investment casting. [http://www.zollern.de/fileadmin/Upload\\_Konzernseite/Downloads/Brochueren/Casting\\_and\\_Forging/Feinguss\\_us.pdf](http://www.zollern.de/fileadmin/Upload_Konzernseite/Downloads/Brochueren/Casting_and_Forging/Feinguss_us.pdf). Acedido a 2015-02-19.
- [79] Viktor Csáky. *Desenvolvimento do processo de produção de próteses crânio-maxilofaciais fundidas*. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014.
- [80] Medição de microdurezas. <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/hardness-testing-part-1-074/>. Acedido a 2015-01-02.
- [81] nanoscience instruments. How an sem works. <http://www.nanoscience.com/products/sem/technology-overview/how-sem-works/>. Acedido a 2015-01-08.

- [82] K.P. Rajurkar, D. Zhu, J.A. McGeough, J. Kozak, and A. De Silva. New developments in electro-chemical machining. *{CIRP} Annals - Manufacturing Technology*, 48(2):567 – 579, 1999.
- [83] K.P. Rajurkar, D. Zhu, J.A. McGeough, J. Kozak, and A. De Silva. Review of electrochemical and electrodischarge machining. *Procedia {CIRP}*, 6(0):13 – 26, 2013.
- [84] Liyang Yue, Zengbo Wang, and Lin Li. Material morphological characteristics in laser ablation of alpha case from titanium alloy. *Applied Surface Science*, 258(20):8065–8071, 2012.
- [85] L. Huang, P. Kinnell, and P.H. Shipway. Parametric effects on grit embedment and surface morphology in an innovative hybrid waterjet cleaning process for alpha case removal from titanium alloys. *Procedia {CIRP}*, 6(0):594 – 599, 2013.
- [86] S. Yanquing, L. Chang, B. Weisheng, G. Jingjie, and J. Jun. Influence of casting processes on shrinkage distribution in tial based alloy shaft castings.



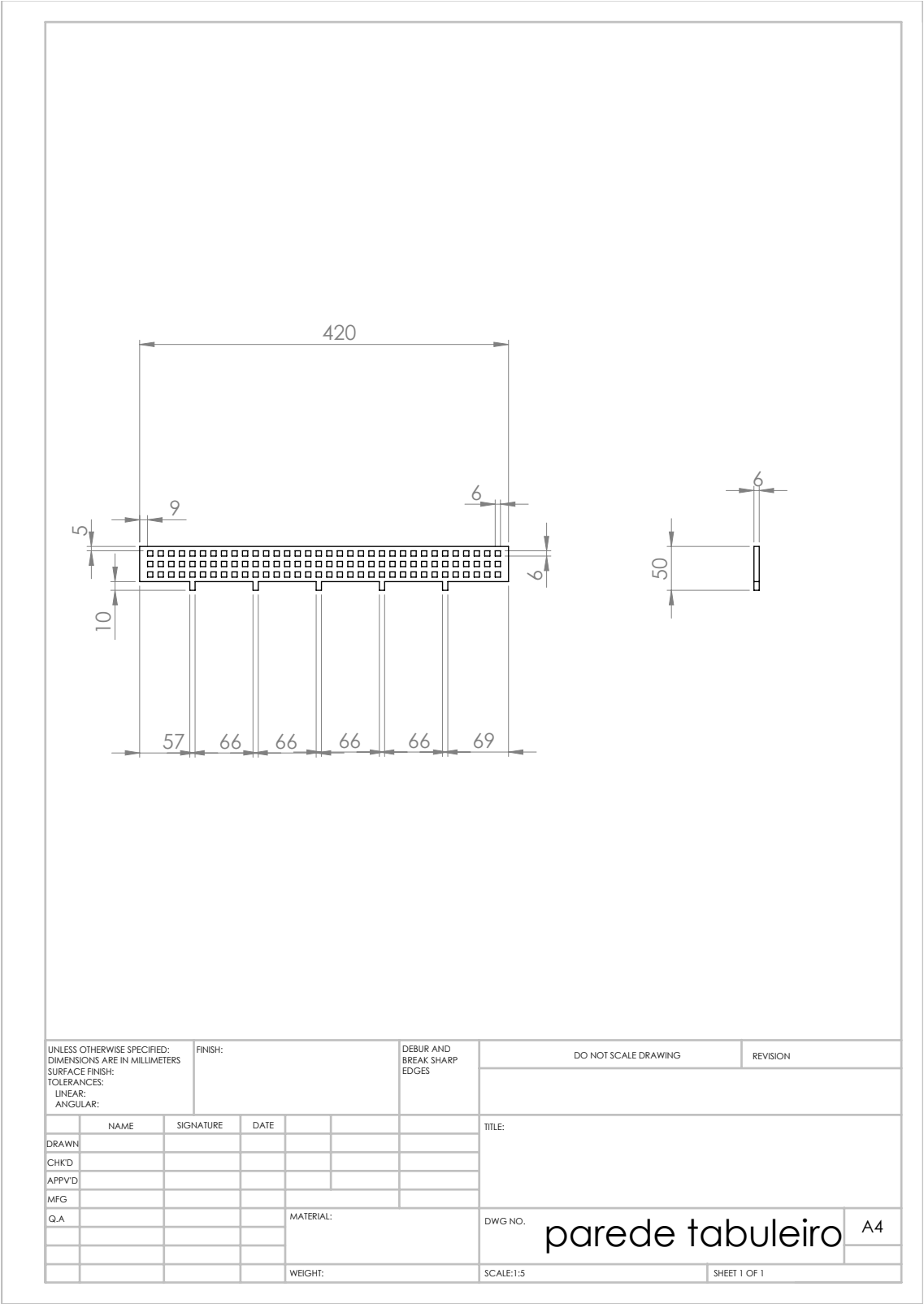


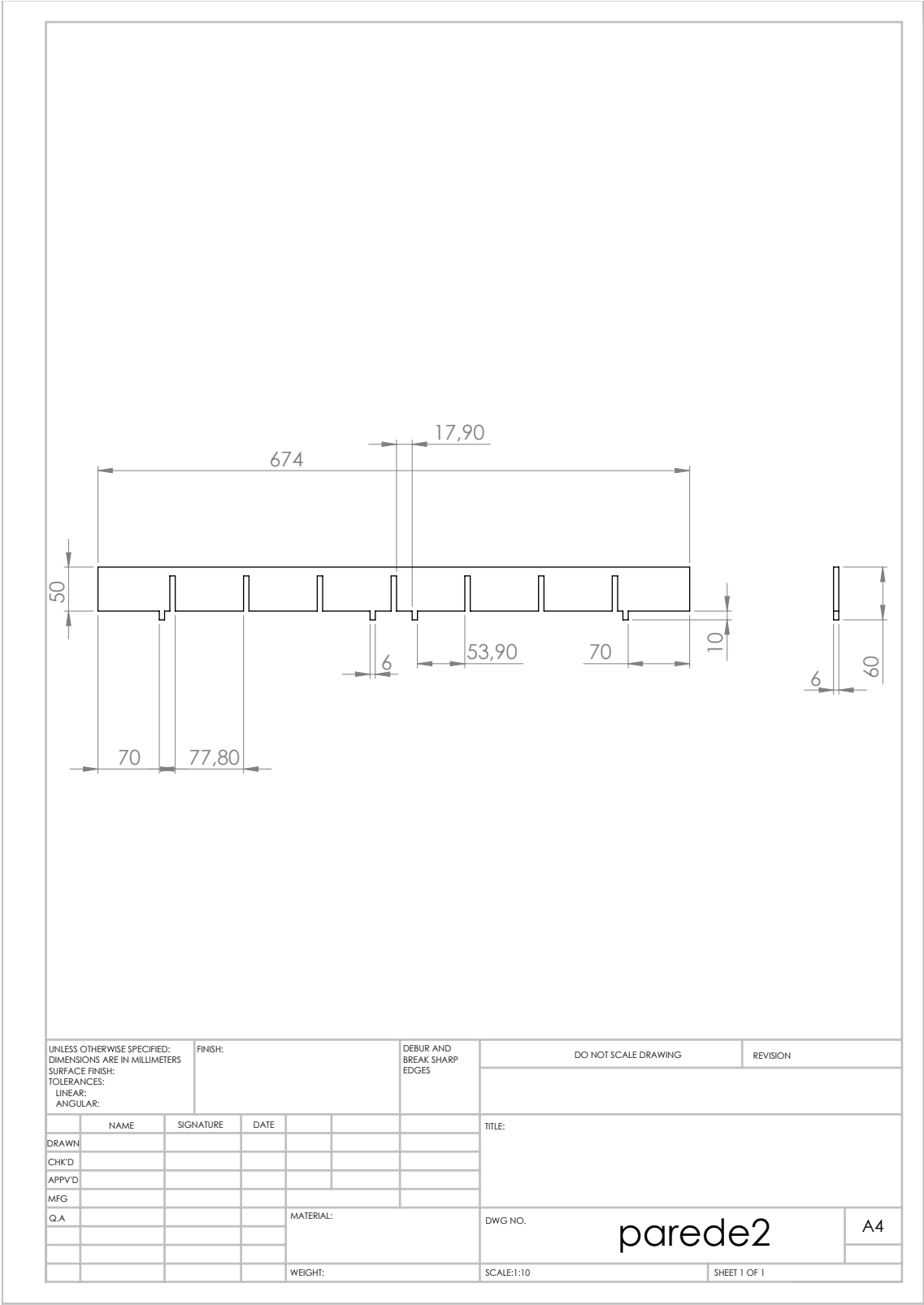
## Capítulo 5

### Anexos

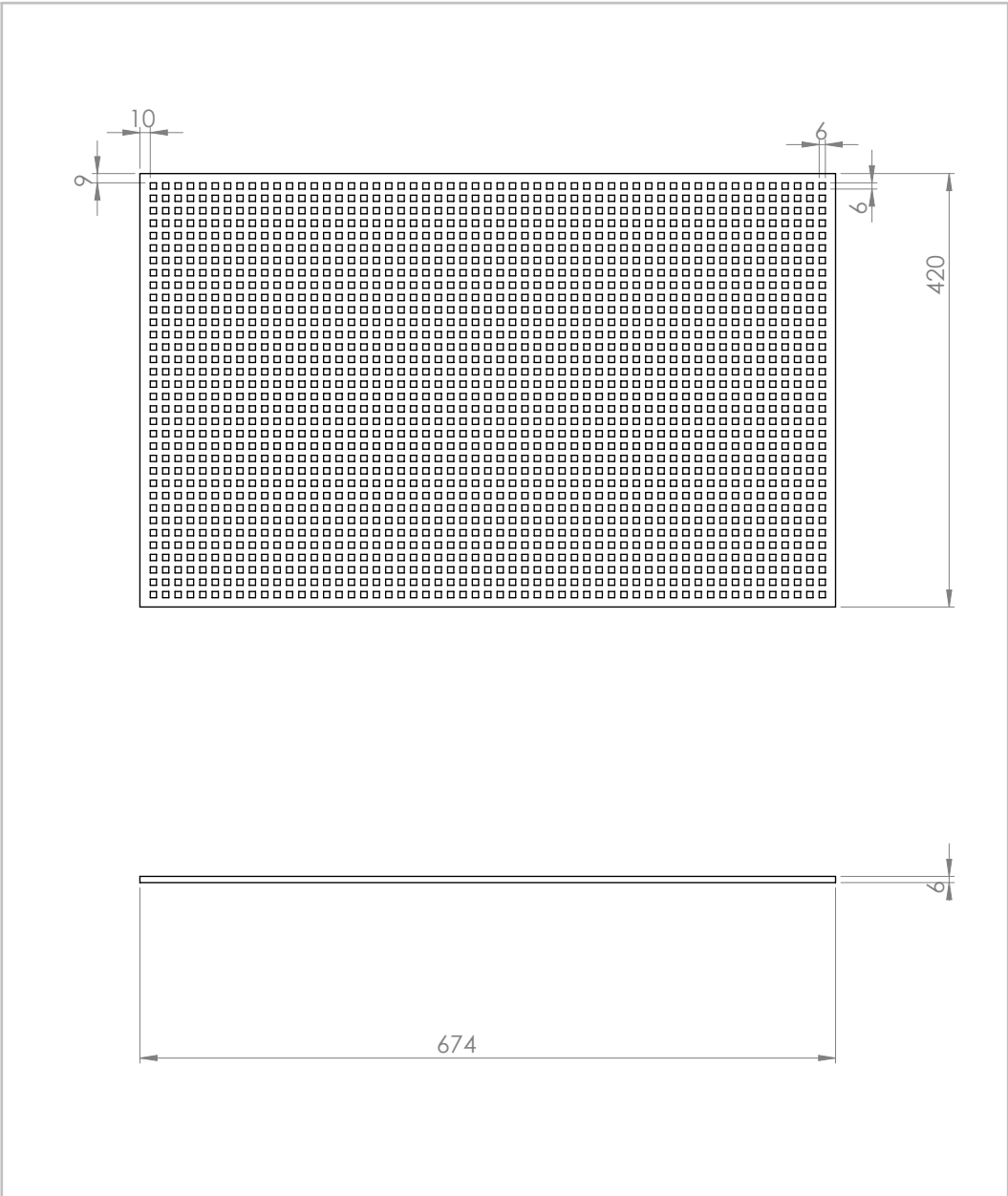
#### 5.1 Anexo A - Desenhos de conjunto dos constituintes do tabuleiro desenvolvido

O presente anexo apresenta os desenhos de conjunto dos componentes que constituem o tabuleiro desenvolvido neste trabalho para a colocação das turbinas.









UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:											
TOLERANCES:											
LINEAR:											
ANGULAR:											
NAME		SIGNATURE		DATE				TITLE:			
DRAWN											
CHK'D											
APP'D											
MFG											
Q.A						MATERIAL:		DWG NO.		A4	
								tabuleiro			
						WEIGHT:		SCALE:1:10		SHEET 1 OF 1	

## 5.2 Anexo B - Fichas de segurança dos ácidos utilizados

O presente anexo tem o intuito de informar quais os cuidados a ter aquando da manipulação dos ácidos utilizados na parte experimental da presente dissertação.

### **5.2.1 Ácido Fluorídrico**



## Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico - FISPQ

Nome do Produto: **ÁCIDO FLUORÍDRICO**

FISPQ N° 020

Data da elaboração: 14/03/2003

REV: 06

Data da Revisão: 29/04/2011

Página 1

### 1. IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO E DA EMPRESA

Nome do produto: **Ácido Fluorídrico**

Nome Químico: Ácido Fluorídrico

Identificação da Empresa:

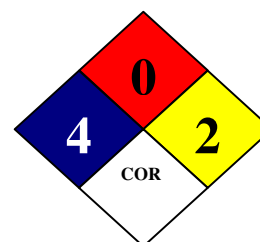
Empresa: Superquímica Comércio e Transporte Ltda

Endereço: Av. Antonio Frederico Ozanan, 540 Bairro Brigadeira Canoas/RS 92420-360

E-mail: [superquimica@superquimica.com.br](mailto:superquimica@superquimica.com.br)

Fone/Fax: (51) 2103-4200

Nº Telefone de Emergência: 0800 118270 - Pró Química/ABIQUIM (gratuito 24 h / dia)  
Bombeiros 193



### 2. IDENTIFICAÇÃO DE PERIGOS

<b>Inalação:</b>	Muito tóxico se inalado. Pode causar irritação do trato respiratório e edemas ao pulmão. Os gases emanados da solução (HF) são considerados altamente tóxicos, concentrações acima de 250 ppm por cinco minutos de exposição pode ser fatal.
<b>Contato com a pele:</b>	Contato com vapor pode causar irritação. Contato com o líquido causa severas e dolorosas queimaduras. Os sintomas de contato com a pele em soluções abaixo de 20% de concentração podem aparecer após 12 horas. Os efeitos do HF podem continuar após vários dias.
<b>Absorção pela pele:</b>	O íon fluoreto penetra rapidamente na pele, causando destruição profunda. Retira o cálcio dos ossos.
<b>Contato com os olhos:</b>	Causa queimaduras graves e imediatas.
<b>Ingestão:</b>	Queimaduras e corrosão na boca, esôfago, estômago e intestinos. A absorção de quantidades significativas de HF por qualquer rota pode ser fatal.
<b>NFPA</b>	Saúde: 4; Inflamabilidade: 0; Reatividade: 2; Corrosivo.

#### EFEITOS AGUDOS SISTÊMICOS:

Apesar de quimicamente um ácido fraco, o HF é extremamente tóxico e corrosivo para pele, olhos, e membranas mucosas devido ao componente fluoreto. É muito frequente os danos nos dedos. A extensão dos danos depende da concentração, total da superfície da pele exposta, direção e duração da exposição bem como a presença de outros agentes químicos ou fatores físicos. Durante o contato inicial com soluções diluídas pode não produzir dor imediata, porém, depois de horas quando o HF penetra profundamente no tecido, o fluoreto juntará com o cálcio do tecido e causará destruição ao tecido (necrósia liquefeita) e dores. Em alguns casos, o osso pode ser corroído. Sistema de absorção do fluoreto pode causar sérias alterações da química do sangue, ritmo cardíaco e pode resultar em morte. O pronto e eficiente primeiro socorro pode alterar o resultado e prevenir sérios danos.

#### EFEITOS CRÔNICOS:

Exposição crônica para alta concentração de vapores pode causar irritação nasal ou bronquites. Repetidas exposições excessivas em concentração de fluoreto durante anos pode causar paralisia (fluoreto depositado nos ossos) que produz aumento na densidade do osso.

#### CONDIÇÕES DE SAÚDE AGRAVADAS PELA SUPER-EXPOSIÇÃO:



## Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico - FISPQ

Nome do Produto: **ÁCIDO FLUORÍDRICO**

FISPQ N° 020

Data da elaboração: 14/03/2003

REV: 06

Data da Revisão: 29/04/2011

Página 2

A exposição humana acima dos limites de tolerância (LT) pode provocar: conjuntivite, queimadura na córnea, graves queimaduras na pele com ulceração, dor atrás do esterno (tórax), tosse cuspindo sangue, dispnéia (dificuldade de respiração), broncopneumonia, cianose (coloração azul e às vezes escura ou lívida da pele por distúrbios circulatórios), estado de choque, espasmos musculares, convulsões, icterícia, diminuição da quantidade de urina, presença de albumina (proteína) na urina, presença de sangue na urina, náusea, vômito, dores abdominais, diarreias, queimaduras e corrosão na boca, esôfago, estômago e intestinos (ingestão), penetrando pela pele e retirando o cálcio dos ossos.

### 3. COMPOSIÇÃO E INFORMAÇÃO SOBRE OS INGREDIENTES

Nome químico: Ácido fluorídrico

Sinônimos: Ácido fluorídrico solução, ácido hidrofúorídrico em solução, fluoreto de hidrogênio em solução aquosa

Fórmula química: HF

Família química: Ácido inorgânico

Peso molecular: 20,01 g/mol

Número CAS: 7664-39-3

### 4. MEDIDAS DE PRIMEIROS-SOCORROS

<b>Inalação:</b>	Remova a vítima para local fresco e arejado. Se não estiver respirando fazer respiração artificial. Se estiver com dificuldade em respirar, administrar oxigênio. Procurar auxílio médico. Observar o paciente por 24 horas para prevenir possíveis sintomas tais como edema pulmonar.
<b>Contato com a pele:</b>	Remover imediatamente as roupas contaminadas. Lavar com água em abundância a área atingida por 3 a 4 minutos. Iniciar a aplicação local de Gluconato de Cálcio GEI a 2,5%, mesmo na ausência de lesões visíveis na pele e unha.
<b>Contato com os olhos:</b>	Enxaguar os olhos com água limpa por pelo menos 30 minutos, levantando as pálpebras algumas vezes, para eliminar quaisquer resíduos do material. Procurar um oftalmologista.
<b>Ingestão:</b>	Não induzir o vômito. Se a vítima estiver consciente, dar grandes quantidades de leite ou uma solução de leite de magnésia e água para diluir o produto. Procurar auxílio de um médico. Nunca dê nada via oral à uma pessoa inconsciente.
<b>Notas para o médico:</b>	Durante o tempo de latência profilaticamente elevadas doses de Prednisolon i.v.. Eventualmente infusões no total aproximadamente 0,5 g THAM/kg. Repouso absoluto. Profilaxia de infecções. Manter livres as vias respiratórias por sucção. Morfina somente pode ser usada em doses mínimas! Espessamento do sangue deve ser combatido por administração peroral de líquido ou clister de gotas, mas não mediante mais infusões i.v. Aplicação de oxigênio.

### 5. MEDIDAS DE COMBATE A INCÊNDIO

<b>Não combustível e não inflamável:</b>	Não é combustível, mas ataca metais produzindo gás hidrogênio que é extremamente inflamável. Não se decompõe, mas devido ao seu baixo ponto de ebulição, o calor aumenta consideravelmente a formação de gases altamente corrosivos.
<b>Ponto de fulgor:</b>	Não aplicável.



## Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico - FISPQ

Nome do Produto: **ÁCIDO FLUORÍDRICO**

FISPQ N° 020

Data da elaboração: 14/03/2003

REV: 06

Data da Revisão: 29/04/2011

Página 3

### Meios de extinção:

Combater com neblina de água. Usar neblina de água para resfriar os tanques. Não usar jato d'água e não jogar água diretamente no vazamento.

### Equipamento para proteção

Os bombeiros devem vestir todos os equipamentos de proteção individual (luvas, óculos, botas e máscaras apropriadas) e também aparatos de respiração.

## 6. MEDIDAS DE CONTROLE PARA DERRAMAMENTO OU VAZAMENTO

### Precauções pessoais

- Remoção de fontes de ignição:
- Controle de poeira:
- Prevenção de inalação e contato com pele, mucosas e olhos:

Eliminar possíveis fontes de calor e ignição.

Não aplicável.

Assegurar ventilação adequada. Usar equipamentos de proteção individual, conjunto completo. Evacuar as pessoas para áreas seguras. Utilizar os equipamentos de proteção individual adequados, conforme indicado na seção 8.

### Precauções meio ambiente

- Procedimentos:

Prevenir que o produto vá para o esgoto, ambiente e cursos de água natural. Terra contaminada deve ser escavada e removida para terreno aprovado. Evitar que o produto atinja cursos d'água e a drenagem do solo.

### Método de limpeza

- Recuperação:
- Disposição:

Represar – diluir com água. Neutralizar com soda cáustica, barrilha ou cal. Utilizar material absorvente inerte.

De acordo com a legislação local vigente.

## 7. MANUSEIO E ARMAZENAMENTO

### Materiais seguros para estocagem

- Adequados:

Tanques de aço até a temperatura de 60 °C devidamente sinalizados e sobre bacias de contenção. Bombonas plásticas homologadas.

### Manuseio:

- Precauções no manuseio:
- Prevenção de exposição:

Manusear o produto em local fresco e arejado e ventilado.

Ventilação local adequada. Manter fontes de calor e/ou ignição afastados do produto. Utilizar os EPI's adequados.

### Armazenamento

- Adequados:

Local seco, coberto, bem ventilado e arejado. Manter afastado de materiais incompatíveis.

## 8. CONTROLE DE EXPOSIÇÃO E PROTEÇÃO INDIVIDUAL

### Proteção respiratória

Usar respirador com fornecimento de ar, pressão positiva e proteção facial ( máscara P.A ) em caso de vazamento do produto ou grande emanção de gás ou mesmo máscara full face com filtro para gases ácidos.

### Proteção para as mãos

Luvas resistentes a ácido fluorídrico (nitrilíca, viton , pvc ou neoprene).



## Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico - FISPQ

Nome do Produto: **ÁCIDO FLUORÍDRICO**

FISPQ N° 020

Data da elaboração: 14/03/2003

REV: 06

Data da Revisão: 29/04/2011

Página 4

### Proteção para os olhos

### Proteção para pele Medidas de controle de engenharia

Óculos de segurança tipo químico para manipulação das bombonas fechadas ou máscara panorâmica quando da manipulação do produto.  
Conjunto completo (botas de borracha ou couro e macacão tipo tyvec ou similar).  
Lava olhos e chuveiros de emergência devem estar próximos ao manuseio e armazenagem do produto. Assegurar adequada ventilação, especialmente em áreas confinadas

## 9. PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS

Estado físico	Líquido
Cor	Incolor
Odor	Forte odor pungente.
pH	Fortemente ácido
Ponto de fusão	-75 °C (sol. 70%)
Ponto de ebulição	65 °C (sol. 70% - 1 atm)
Faixa de temperatura de ebulição	Não disponível.
Ponto de fulgor	Não aplicável.
Taxa de evaporação	Não determinado.
Inflamabilidade	Não aplicável.
Limite de explosividade	Não aplicável.
Pressão de vapor	20 kPa a 20° C 43 kPa a 40° C
Densidade de vapor (ar = 1)	2,21.
Densidade	1,258 g/cm <sup>3</sup> a 20 °C (sol. 70%)
Solubilidade	Muito solúvel.
Coefficiente de partição – n-octanol/água	Não determinado.
Temperatura de auto-ignição	Não aplicável
Temperatura de decomposição	Não disponível.
Viscosidade	Não disponível.

## 10. ESTABILIDADE E REATIVIDADE

Estabilidade	É estável sobre condições normais de estocagem e manuseio.
Condições a evitar	Evite contatos com materiais combustíveis e orgânicos, pois pode provocar fogo. Em contato com alguns metais pode liberar hidrogênio.
Produtos da decomposição	Desprende gás hidrogênio na reação com metais e a decomposição térmica oxidativa do HF pode produzir fumos de fluoreto altamente corrosivos.
Materiais incompatíveis	Reação explosiva com glicerol e ácido nítrico, sódio (com solução aquosa ácida), fluoreto cianogênico, ácido metanossulfônico (envolve explosão de difluoreto de oxigênio). Reage violentamente com anidrido acético, hidróxido de amônia, 2-amino etanol, trióxido de arsênio, pentóxido fosforoso, ácido colossulfônico, permanganato



## Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico - FISPQ

Nome do Produto: **ÁCIDO FLUORÍDRICO**

FISPQ N° 020

Data da elaboração: 14/03/2003

REV: 06

Data da Revisão: 29/04/2011

Página 5

de potássio, diamina etileno, flúor, amino etileno, n-fenil azo piridina. Pode atacar vidro, concreto e certos metais contendo sílica, bem como os que fundem ferro. Atacará borracha natural, couro e muitos materiais orgânicos.

### 11. INFORMAÇÕES TOXICOLÓGICAS

Apresenta forte odor irritante detectável a uma concentração de 0,0333 mg/m<sup>3</sup>, tornando-se irritante a 4,17 mg/m<sup>3</sup>

STEL (15 min): 6 ppm

Limite de tolerância / TWA (8 horas): 3 ppm

Limite de tolerância Valor teto: 3 ppm.

IPVS : 30 ppm.

LD50 (Oral): 25 mg/kg

LC50 (Inalação em rato): 1276 ppm/1 hora

Não é cancerígeno.

#### Toxidade aguda

#### Toxidade crônica

#### Efeitos locais

Inalação (camundongo) LC<sub>50</sub> - 1 hora = 342 ppm

Pode causar fluorose.

Muito tóxico se inalado, em contato com a pele e se engolido. Causa severas queimaduras. Inalação dos vapores em altas concentrações pode causar diminuição do fôlego (edema pulmonar). Ingestão causa queimaduras do trato digestivo e respiratório.

### 12. INFORMAÇÕES ECOLÓGICAS

Atenção especial deve ser dada para o excesso de flúor no solo após a neutralização do produto especialmente se a área for usada para agricultura. Fazer controle prévio.

#### Impacto ambiental

#### Ecotoxicidade

Impedir infiltração no solo, linhas de água e canalização.

Toxicidade crônica, peixe = 60 ppm/peixe/letal/água fresca (período de tempo não especificado). Certamente se o local persistir com alcalinidade natural será lentamente dissipada a acidez.

### 13. CONSIDERAÇÕES SOBRE TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO

#### Métodos de tratamento e disposição

- Produto:

Deve ser neutralizados com barrilha ou cal e devem ser encaminhados juntamente com as águas de detenção para estação de tratamento de efluentes. Controlar valores limites de flúor em conformidade com a legislação.

- Resíduo:

Idem ao produto.

- Embalagem usada:

Os recipientes ou tanques de ácido fluorídrico não devem ser utilizados para outros produtos. Em caso de desativação de equipamentos, neutralizar com barrilha ou soda, lavar bem e sucatear.



## Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico - FISPQ

Nome do Produto: **ÁCIDO FLUORÍDRICO**

FISPQ N° 020

Data da elaboração: 14/03/2003

REV: 06

Data da Revisão: 29/04/2011

Página 6

### 14. INFORMAÇÕES SOBRE TRANSPORTE

#### Transporte Terrestre

Número ONU	1790
Nome apropriado para embarque	ACIDO FLUORÍDRICO SOLUÇÃO, com mais de 60% de ácido fluorídrico
Classe de risco	8
Número de risco	886
Risco subsidiário	6.1
Grupo de embalagem	I
Rótulo	CORROSIVO

### 15. REGULAMENTAÇÕES

Legislação de Transporte Rodoviário de Cargas Perigosas: Decreto 96044 de 18/05/88

Portaria no 204 de 20/05/97 do Ministério dos Transportes.

NBR 7500:2009 ABNT

NR 15 ABNT

NBR 14725-ABNT (Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos - FISPQ).

### 16. OUTRAS INFORMAÇÕES

Os dados e informações aqui transcritos se revestem de caráter meramente complementar, são fornecidos de boa fé, e representam o que de melhor até hoje se tem conhecido sobre a matéria, não significando, porém, que exauram completamente o assunto.

Nenhuma garantia é dada sobre o resultado da aplicação destes dados e informações, não eximindo os usuários de suas responsabilidades em qualquer fase do manuseio do produto.



### **5.2.2 Ácido Nítrico**

**ÁCIDO NÍTRICO**

ÁCIDO NÍTRICO CONCENTRADO (70%)



Massa molecular: 63,0

Nº CAS 7697-37-2

Nº RTECS QU5775000

Nº NU 2031

Nº CE 007-004-00-1

Identificação dos perigos	Principais perigos Sintomas Sinais	Prevenção/Cuidados Protecção pessoal	Combate ao incêndio Primeiros socorros
<b>Incêndio</b>	Não combustível mas intensifica a combustão de outras substâncias. Num incêndio, liberta fumos (ou gases) irritantes ou tóxicos.	<b>Nenhum</b> contacto com substâncias inflamáveis, Nenhum contacto com químicos combustíveis ou orgânicos.	Em caso de incêndio nas imediações: <b>não usar espuma.</b>
<b>Explosão</b>	Risco de fogo ou explosão em contacto com muitos compostos orgânicos comuns.		Em caso de incêndio: manter os contentores, frios aspergindo-os com água.
<b>Exposição</b>			
<b>Efeitos da inalação</b>	Sensação de ardor. Tosse. Respiração difícil. Inconsciência. Os sintomas podem não se manifestar imediatamente (ver Notas).	Ventilação, exaustão local ou protecção respiratória.	Ar fresco, descanso. Posição soerguida. Respiração artificial se indicado. Assistência médica.
<b>Efeitos nos olhos</b>	Corrosivo. Vermelhidão. Dor. Queimaduras profundas graves.	Protecção facial ou protecção ocular combinada com protecção respiratória.	Primeiro enxaguar com bastante água durante alguns minutos (retirar lentes de contacto se for possível). Encaminhar para assistência médica.
<b>Efeitos da ingestão</b>	Corrosivo. Dores abdominais. Sensação de ardor. Estado de choque.	<b>Não</b> comer, beber ou fumar durante o trabalho. Lavar as mãos antes de comer.	<b>Não</b> provocar o vômito. Dar muita água a beber. Descansar. Encaminhar para assistência médica.

**EVITAR QUALQUER CONTACTO!**

<b>Derrame</b>	Evacuar a área de perigo! Consultar um perito! Ventilar. Recolher o líquido derramado em contentores fechados. Neutralizar cuidadosamente os resíduos com carbonato de sódio. Depois enxaguar com muita água. <b>Não</b> absorver com serradura ou outro absorvente combustível (protecção pessoal extra: fato de protecção completa com dispositivo de respiração integrado).
----------------	--

<b>Armazenamento</b>	Separar de substâncias combustíveis e redutoras, bases, químicos orgânicos. Fresco. Seco. Conservar numa dependência bem ventilada.
----------------------	---

<b>Embalagens e rótulos</b> (símbolos, frases de risco e frases de segurança)	<b>Símbolo O</b> <b>Símbolo C</b>   R: 8-35 S: 1/2- 23-26-36-45 Empacotamento inquebrável; colocar as embalagens quebráveis num contentor fechado inquebrável.
--	---

Dados importantes	
<b>Perigos físicos</b>	
<b>Perigos químicos</b>	Ao aquecer, a substância decompõe-se produzindo óxidos de azoto. A substância é um oxidante forte e reage violentamente com materiais combustíveis e redutores, tais como, a terebintina, o carvão vegetal e o álcool. A substância é um ácido forte que reage violentamente com bases e corrói os metais. Reage violentamente com químicos orgânicos (acetona, ácido acético, anidrido acético) provocando risco de incêndio e explosão. Ataca alguns plásticos.
<b>Valor limite de exposição</b>	VLE (a): 2 ppm; 5,2 mg/m <sup>3</sup> VLE-CD (b): 4ppm; 10 mg/m <sup>3</sup>
<b>Vias de absorção</b>	A substância pode ser absorvida por inalação do seu vapor e por ingestão.
<b>Risco de inalação</b>	Poderá ocorrer uma rápida e perigosa contaminação do ar, se a substância se evaporar a 20°C.
<b>Efeitos de uma curta exposição</b>	A substância é muito corrosiva para os olhos, pele e tracto respiratório. A sua ingestão é igualmente corrosiva. A inalação do vapor pode causar edema pulmonar (ver Notas).

<b>Propriedades físicas</b>	Líquido incolor a amarelo, com odor acre/cáustico. Ponto de ebulição: 121°C Ponto de fusão: -41,6°C Densidade relativa: 1,4 Solubilidade na água: miscível. Pressão de vapor, kPa a 20°C: 6,4 Densidade relativa do vapor (ar=1): 2,2 Densidade relativa da mistura vapor/ar a 20°C (ar=1): 1,07
-----------------------------	---

<b>Notas</b>	Dependendo do grau de exposição, recomenda-se exame médico periódico. Os sintomas de edema pulmonar muitas vezes só se manifestam algumas horas mais tarde e são agravados pelo esforço físico. Por isso são essenciais o descanso e a observação médica. Enxaguar o vestuário contaminado (perigo de fogo) com muita água. Risco nível 8 NU.
--------------	--

(a) Fez-se corresponder VLE a TLV - TWA

(b) Fez-se corresponder VLE - CD a TLV - STEL

Adaptado de **International Labour Organization (ILO)**: <http://www.ilo.org/public/english/protection/safework/cis/products/icsc/dtasht/>  
Centro Internacional de Segurança e Saúde no Trabalho (CIS)

### **5.2.3 Ácido Sulfúrico**

# ÁCIDO SULFÚRICO

ÁCIDO SULFÚRICO 100%



Massa molecular: 98,1

Nº CAS 7664-93-9

Nº RTECS WS5600000

Nº NU 1830


Nº CE 016-020-00-8

Identificação dos perigos	Principais perigos Sintomas Sinais	Prevenção/Cuidados Protecção pessoal	Combate ao incêndio Primeiros socorros
<b>Incêndio</b>	Não é combustível. Muitas reacções podem originar incêndio ou explosão. Num incêndio, liberta gases ou fumos irritantes ou tóxicos.	<b>Nenhum</b> contacto com substâncias inflamáveis nem combustíveis.	<b>Não</b> usar água. Em caso de incêndio nas proximidades, usar pó, espuma e dióxido de carbono.
<b>Explosão</b>	Perigo de incêndio e explosão em contacto com bases, substâncias combustíveis, oxidantes, agentes redutores ou água.		Em caso de incêndio: conservar os contentores, frios aspergindo-os com água. <b>Não</b> permitir o contacto directo com a água.
<b>Exposição</b>	<b>CONSULTAR O MÉDICO EM TODAS AS SITUAÇÕES!</b>		
<b>Efeitos da inalação</b>	Corrosivo. Sensação de ardor. Garganta irritada. Tosse. Respiração difícil. Falta de ar. Os sintomas podem não se manifestar logo (ver Notas).	Ventilação, exaustão local ou protecção respiratória.	Ar fresco, descanso. Posição meio soerguida. Respiração artificial se indicado. Assistência médica.
<b>Efeitos na pele</b>	Corrosivo. Vermelhidão. Dores. Bolhas. Queimaduras graves na pele.	Luvas e vestuário de protecção.	Retirar a roupa contaminada. Enxaguar a pele com muita água. Assistência médica recomendada.
<b>Efeitos nos olhos</b>	Corrosivo. Vermelhidão. Dores. Queimaduras profundas graves.	Protecção facial ou protecção ocular combinada com protecção respiratória.	Primeiro enxaguar com bastante água durante alguns minutos (retirar lentes de contacto se for fácil). Encaminhar para assistência
<b>Efeitos da ingestão</b>	Corrosivo. Dores abdominais. Sensação de ardor. Estado de choque ou desfalecimento.	<b>Não</b> comer, beber ou fumar durante o trabalho.	Lavar bem a boca. <b>Não</b> provocar o vômito. Assistência médica recomendada.

**PREVENIR A FORMAÇÃO DE NÉVOAS E VAPORES! EVITAR QUALQUER CONTACTO!**

<b>Derrame</b>	Consultar um perito! Evacuar a área de perigo! Neutralizar cuidadosamente os resíduos com carbonato de sódio. Depois enxaguar com muita água. <b>Não</b> absorver com serradura ou outro absorvente combustível (protecção pessoal extra: fato de protecção completa com dispositivo de respiração integrado). <b>Impedir</b> que este químico seja derramado para o ambiente.
----------------	--

<b>Armazenamento</b>	Separar de substâncias combustíveis e redutoras, oxidantes fortes, bases fortes, materiais incompatíveis. Pode ser armazenado em contentores de aço inoxidável. Armazenar numa área que possua pavimento em betão resistente à corrosão.
----------------------	--

<b>Embalagens e rótulos</b> (símbolos, frases de risco e frases de segurança)	<b>Símbolo C</b> 	R: 35 S: (1/2-)26-30-45 Empacotamento inquebrável; colocar as embalagens quebráveis num contentor fechado inquebrável. Não transportar com produtos incompatíveis.
--	--	--

Dados importantes	
<b>Perigos físicos</b>	
<b>Perigos químicos</b>	A substância é um oxidante forte e reage violentamente com materiais combustíveis e redutores. A substância é um ácido forte que reage violentamente com bases e corrói os metais mais comuns, formando um gás inflamável e explosivo (hidrogénio). Reage violentamente com a água e materiais orgânicos, com libertação de calor (ver Notas). Ao aquecer formam-se gases/fumos irritantes ou tóxicos (óxidos sulfúricos).
<b>Valor limite de exposição</b>	VLE(a): 1 mg/m <sup>3</sup> ; VLE-CD (b): 3mg/m <sup>3</sup> , ácido sulfúrico contido em fortes névoas de ácido inorgânico.
<b>Vias de absorção</b>	A substância pode ser absorvida pelo corpo por inalação do seu aerossol ou por ingestão.
<b>Risco de inalação</b>	A evaporação a 20°C é insignificante; em spray pode atingir-se rapidamente uma concentração perigosa de partículas no ar.
<b>Efeitos de uma curta exposição</b>	Corrosivo. A substância é muito corrosiva para os olhos, pele e tracto respiratório. Corrosiva se ingerida. A inalação da substância em aerossol pode causar edema pulmonar.
<b>Efeitos de uma exposição prolongada</b>	Os pulmões podem ser afectados e existe risco de erosão dental pela exposição repetida ou prolongada a esta substância em aerossol. Névoas fortes de ácidos inorgânicos que contenham esta substância são cancerígenos.

<b>Propriedades físicas</b>	Líquido incolor, oleoso, higroscópico, sem odor. Ponto de ebulição (decompõe-se): 340°C Ponto de fusão: 10°C Densidade relativa: 1,8 Solubilidade na água: miscível. Pressão de vapor, kPa a 146° C: 0,13 Densidade relativa do vapor (ar=1): 3,4
-----------------------------	---

<b>Dados ambientais</b>	A substância é perigosa para os organismos aquáticos.
-------------------------	---

<b>Notas</b>	Muitas vezes os sintomas de edema pulmonar só se manifestam algumas horas mais tarde e são agravados pelo esforço físico. Por isso são essenciais o descanso e a observação médica. <b>Nunca</b> verter água nesta substância; ao dissolver ou diluir, adicioná-la sempre muito lentamente à água. Risco nível 8 NU.
--------------	---

(a) Fez-se corresponder VLE a TLV - TWA

(b) Fez-se corresponder VLE - CD a TLV - STEL

Adaptado de **International Labour Organization (ILO)**: <http://www.ilo.org/public/english/protection/safework/cis/products/icsc/dtasht/>  
Centro Internacional de Segurança e Saúde no Trabalho (CIS)

### 5.3 Anexo C - Espectros de constituintes das amostras sujeitas ao SEM e respectivas imagens

No capítulo 3.1.4.2 foram apresentados alguns dos espectros das amostras submetidas a análise no SEM. O presente anexo tem o objetivo de expor os espectros restantes assim como algumas imagens das respetivas amostras.

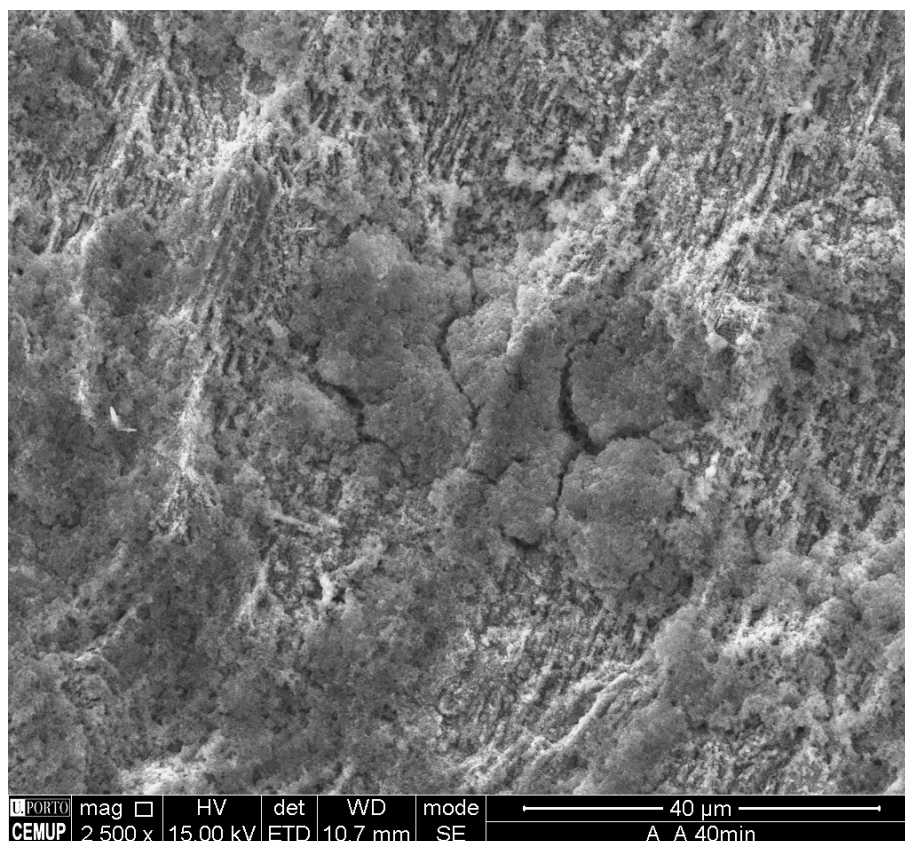


Fig. 5.1: Imagem SEM da turbina  $A_A$  maquinada durante 40 minutos onde se verifica a camada de  $TiO_2$



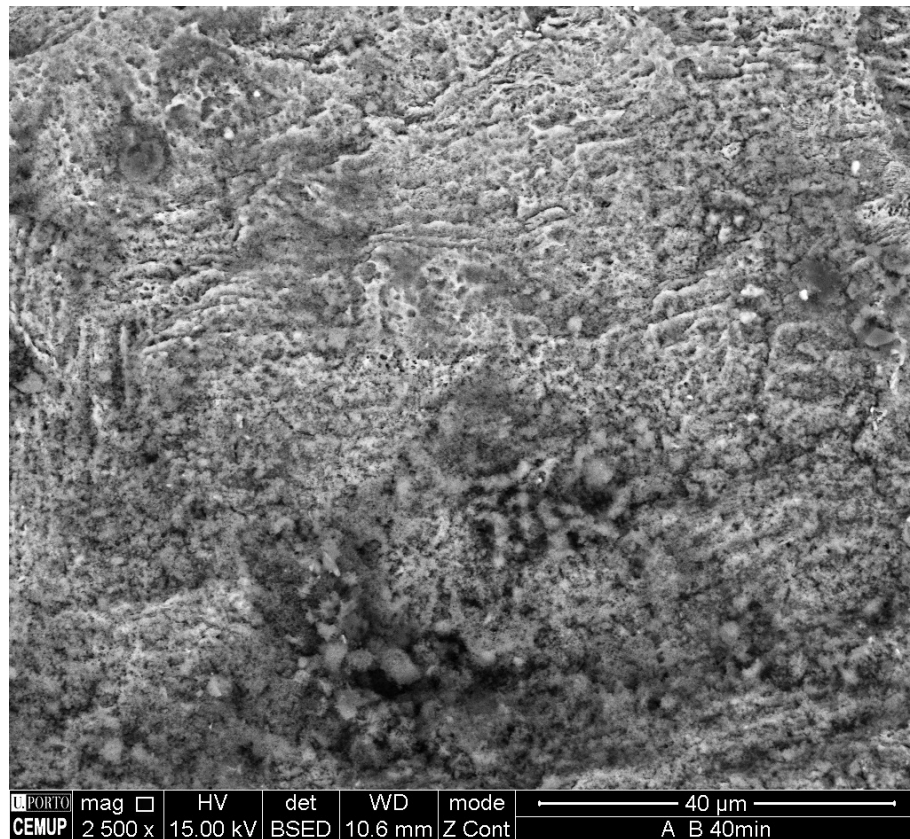


Fig. 5.2: Imagem SEM da turbina  $A_B$  maquinada durante 40 minutos onde se verifica a camada de  $TiO_2$

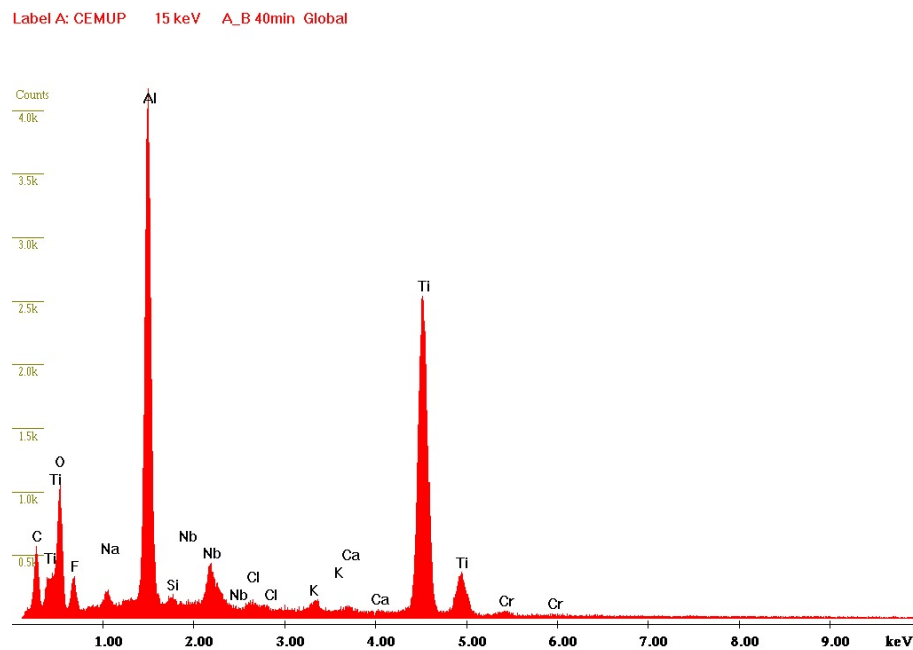


Fig. 5.3: Espectro da base da turbina  $A_B$  maquinada durante 40 minutos onde se verifica a camada de  $TiO_2$



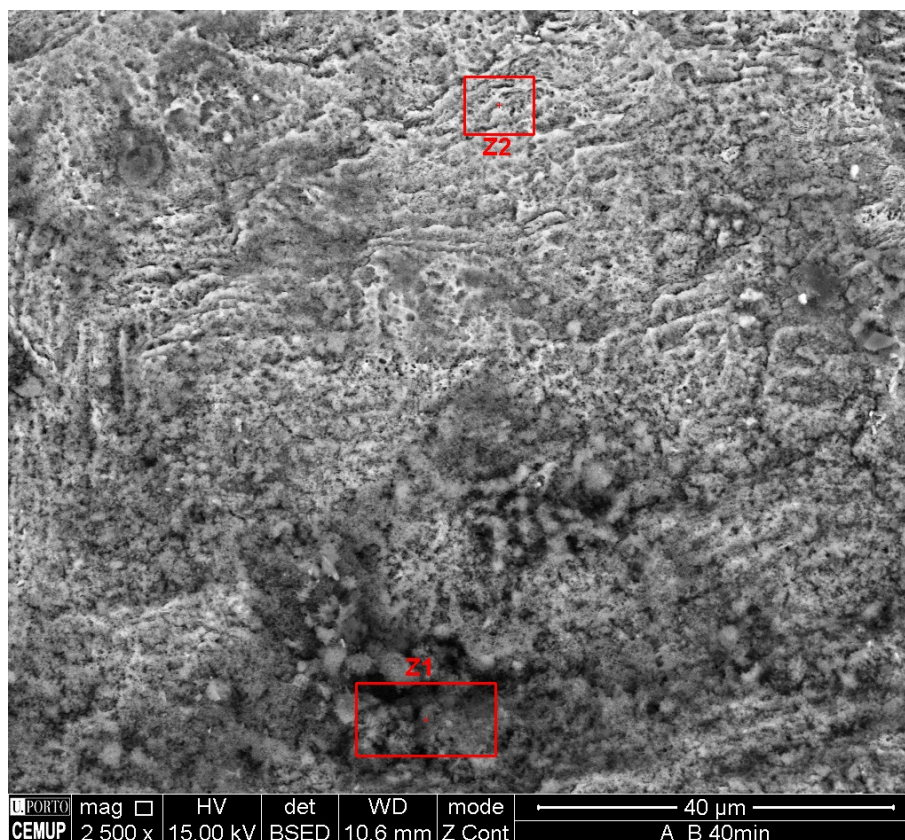


Fig. 5.4: Imagem SEM da turbina  $A_B$  maquinada durante 40 minutos com a localização das zonas Z1 e Z2

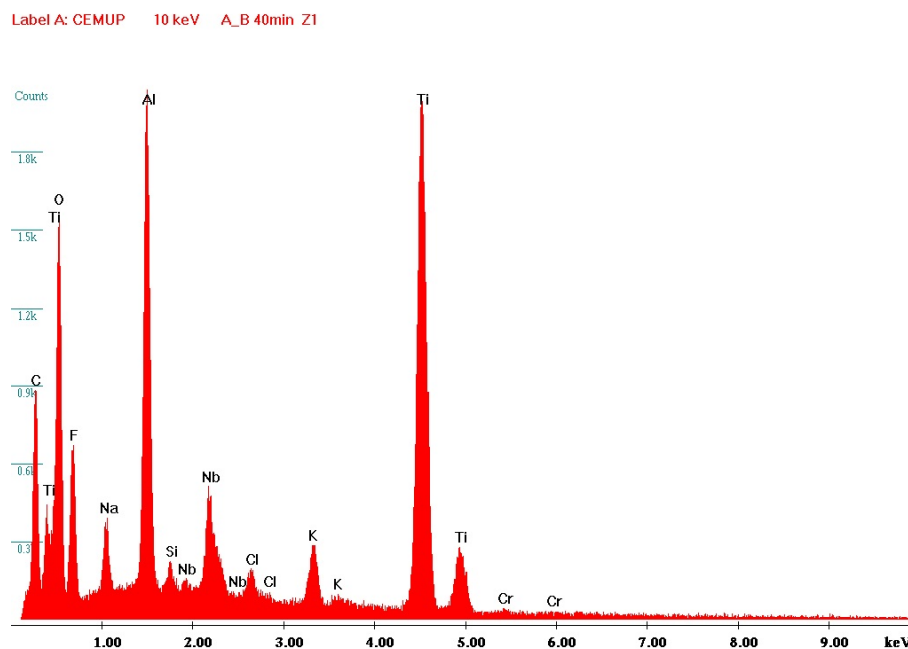


Fig. 5.5: Espectro da base da turbina  $A_B$  maquinada durante 40 minutos na zona Z1

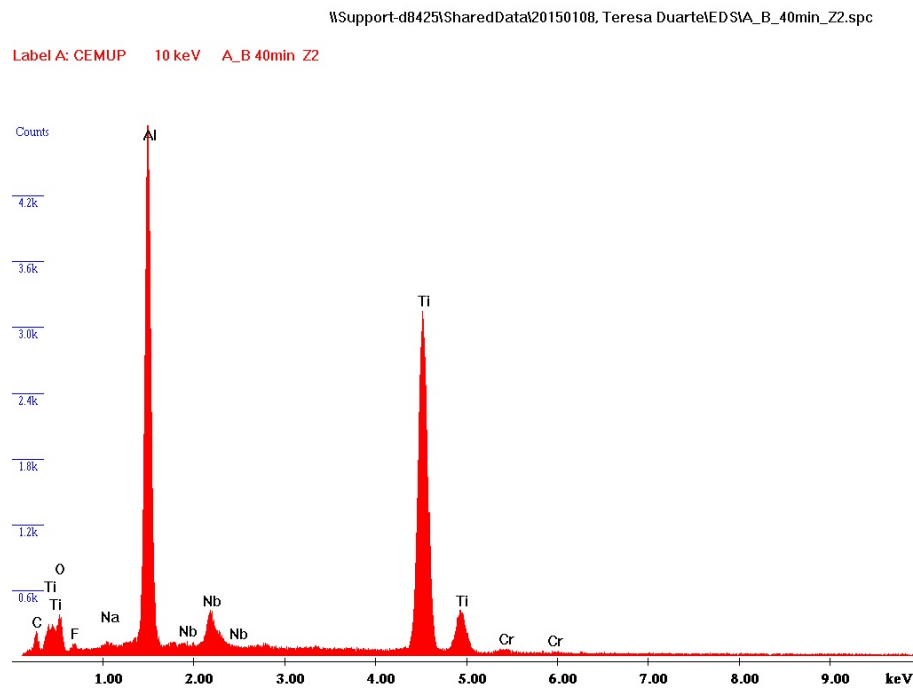


Fig. 5.6: Espectro da base da turbina  $A_B$  maquinada durante 40 minutos na zona Z2



Fig. 5.7: Imagem SEM da turbina  $B_A$  maquinada durante 50 minutos com a localização das zonas Z1 e Z2

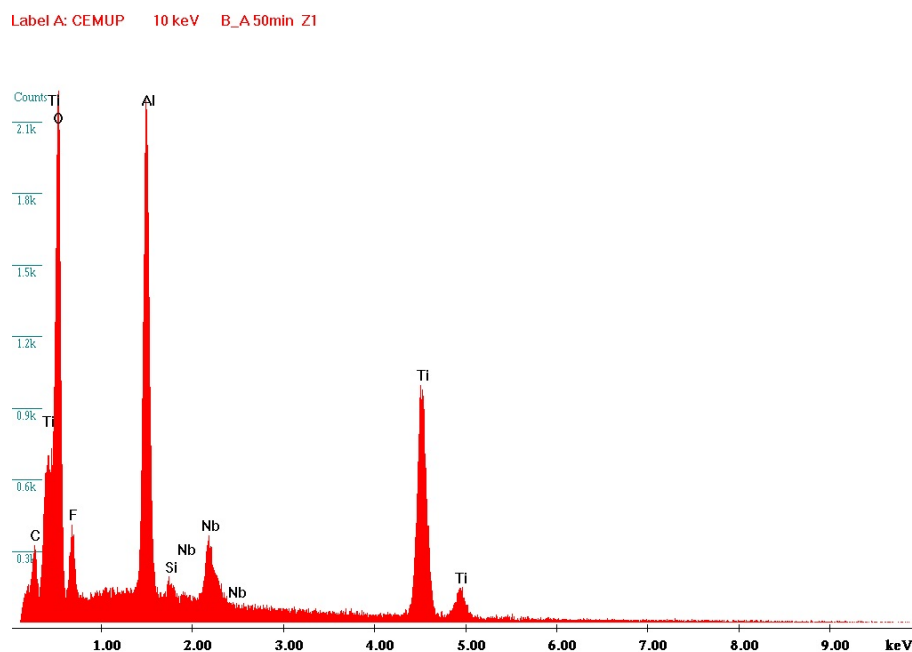


Fig. 5.8: Espectro da alheta da turbina  $B_A$  maquinada durante 50 minutos na zona Z1

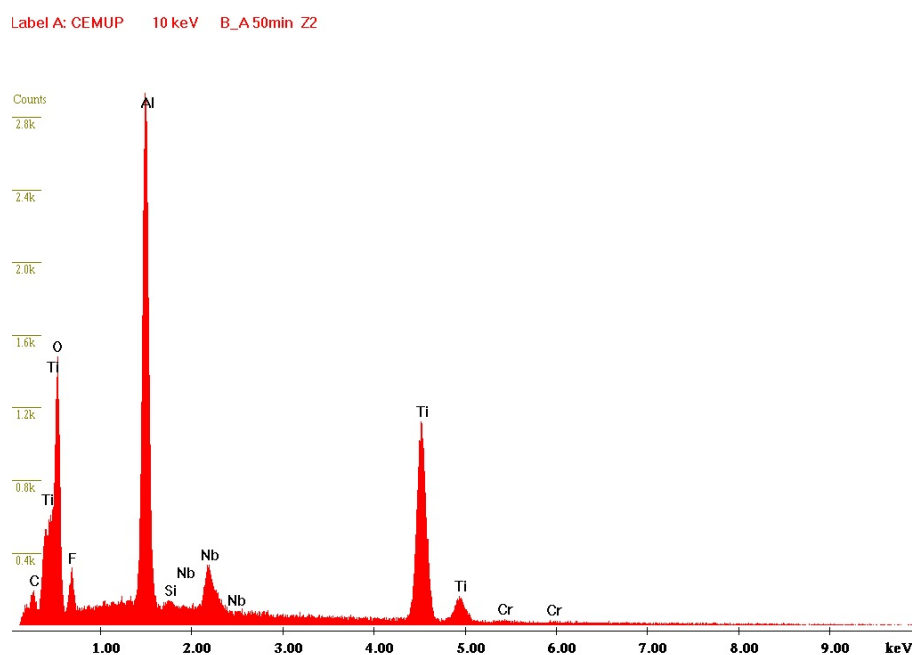


Fig. 5.9: Espectro da alheta da turbina  $B_A$  maquinada durante 50 minutos na zona Z2



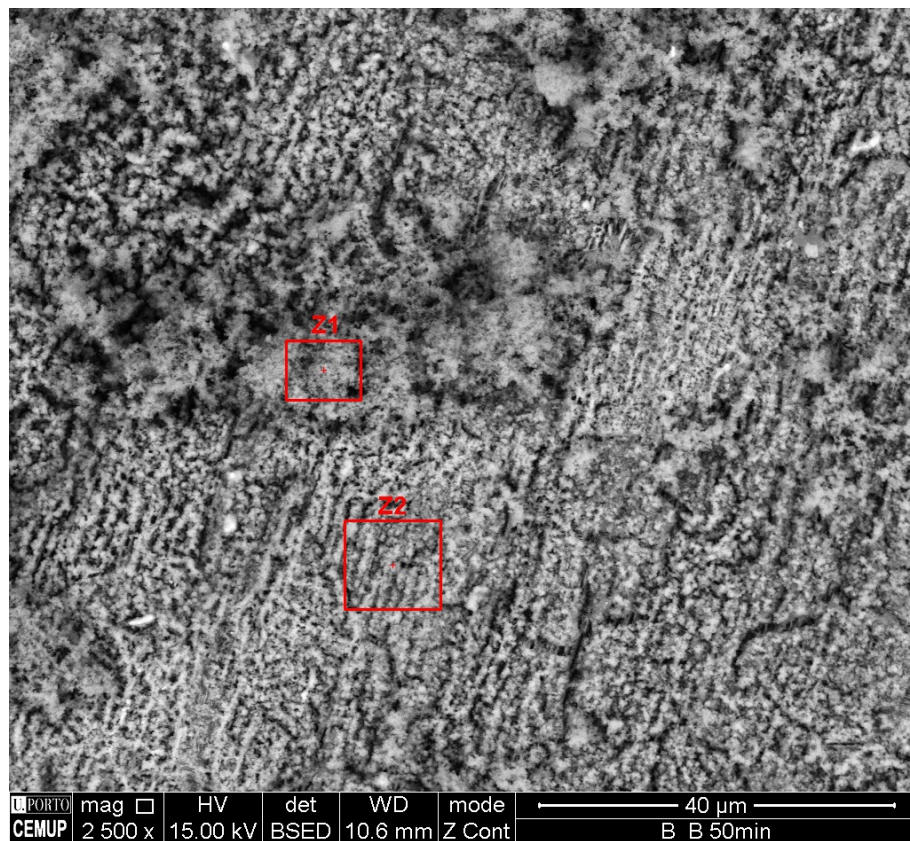


Fig. 5.10: Imagem SEM da turbina  $B_B$  maquinada durante 50 minutos com a localização das zonas Z1 e Z2

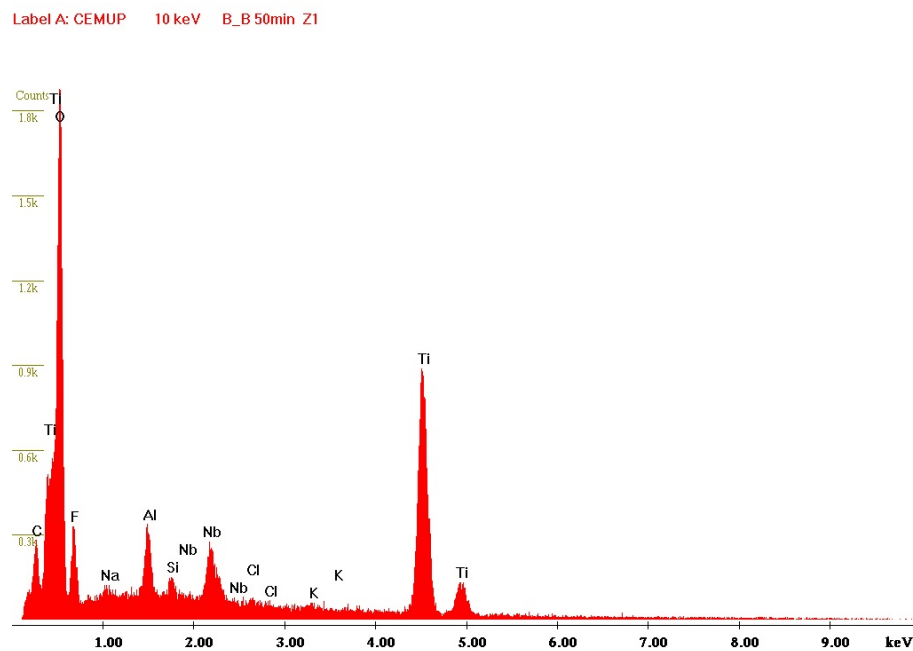


Fig. 5.11: Espectro da base da turbina  $B_B$  maquinada durante 50 minutos na zona Z1

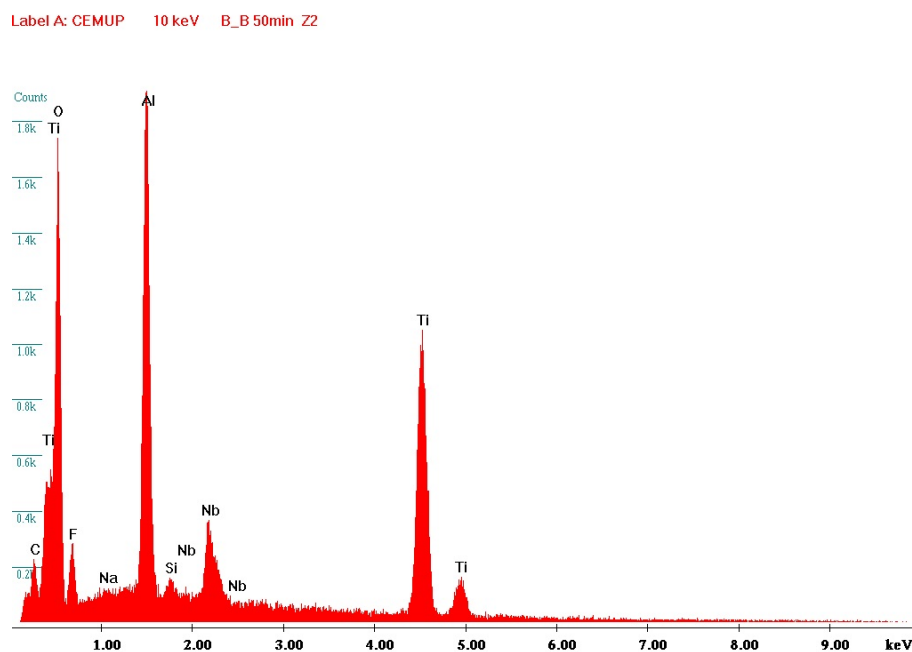


Fig. 5.12: Espectro da base da turbina  $B_B$  maquinada durante 50 minutos na zona Z2

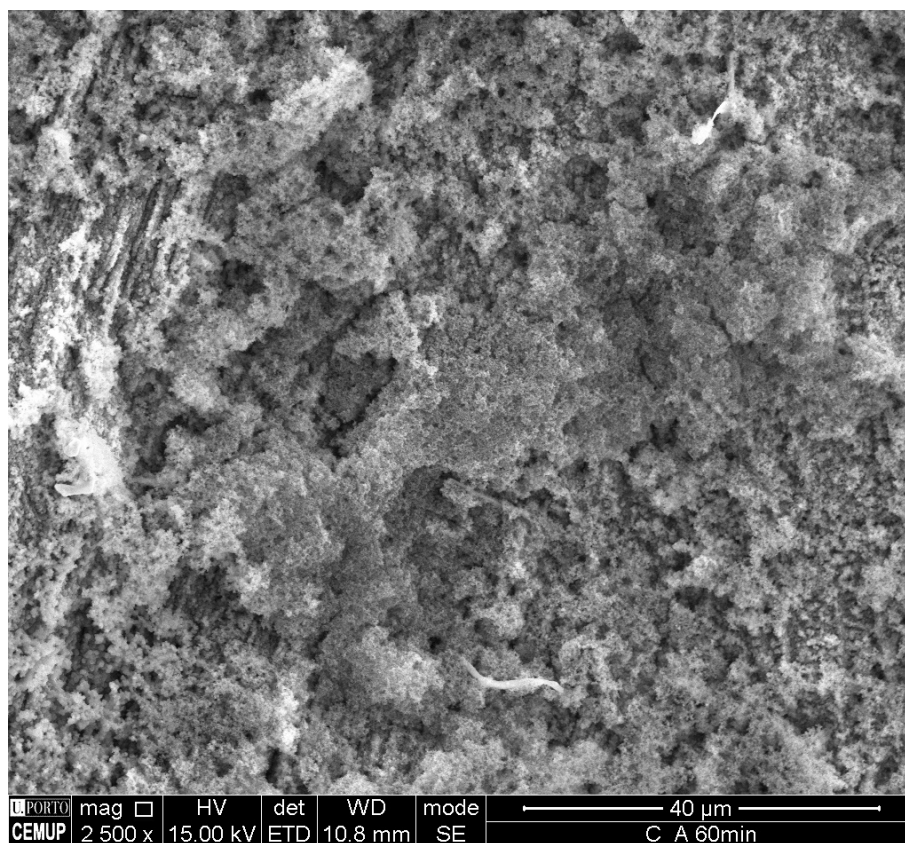


Fig. 5.13: Imagem SEM da turbina  $C_A$  maquinada durante 60 minutos



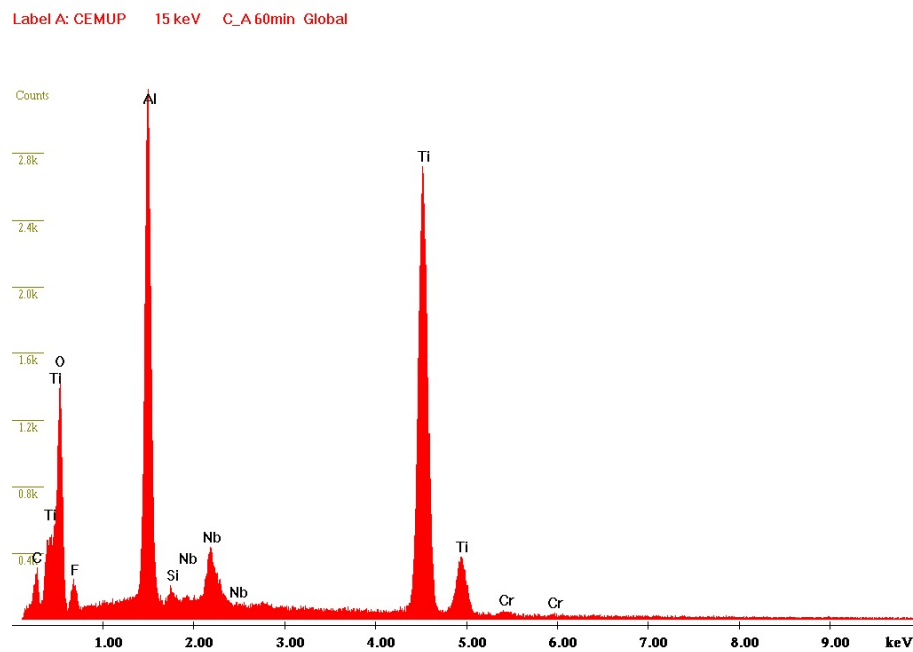


Fig. 5.14: Espectro global da alheta da turbina  $C_A$  maquinada durante 60 minutos

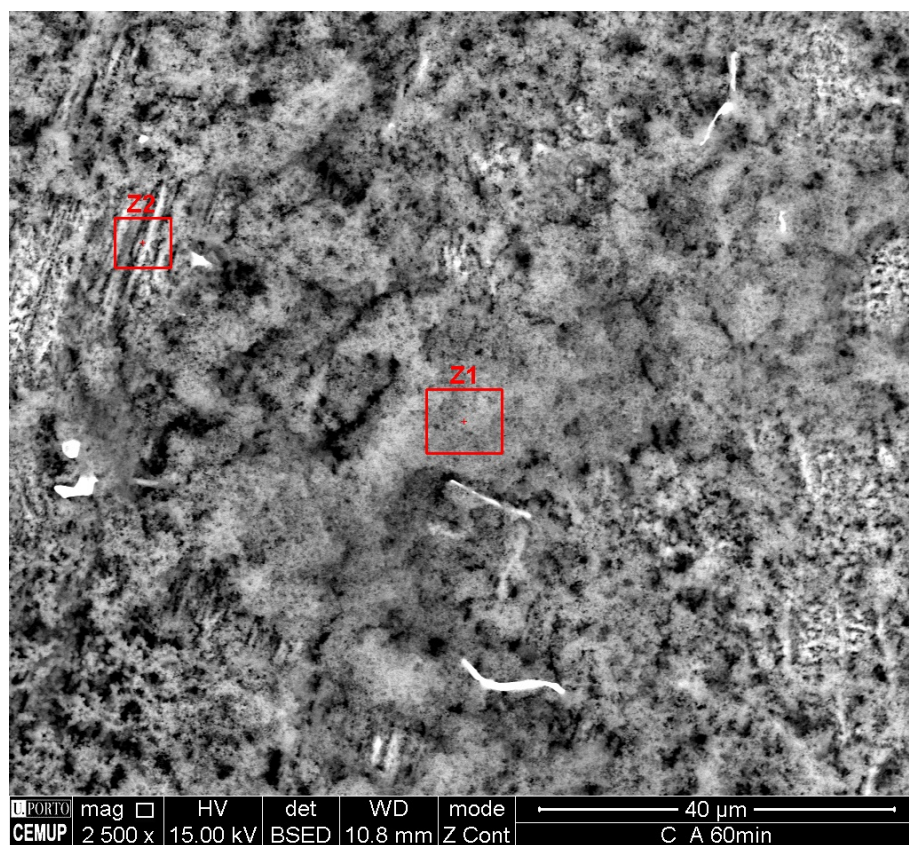


Fig. 5.15: Imagem SEM da turbina  $C_A$  maquinada durante 60 minutos com a localização das zonas Z1 e Z2

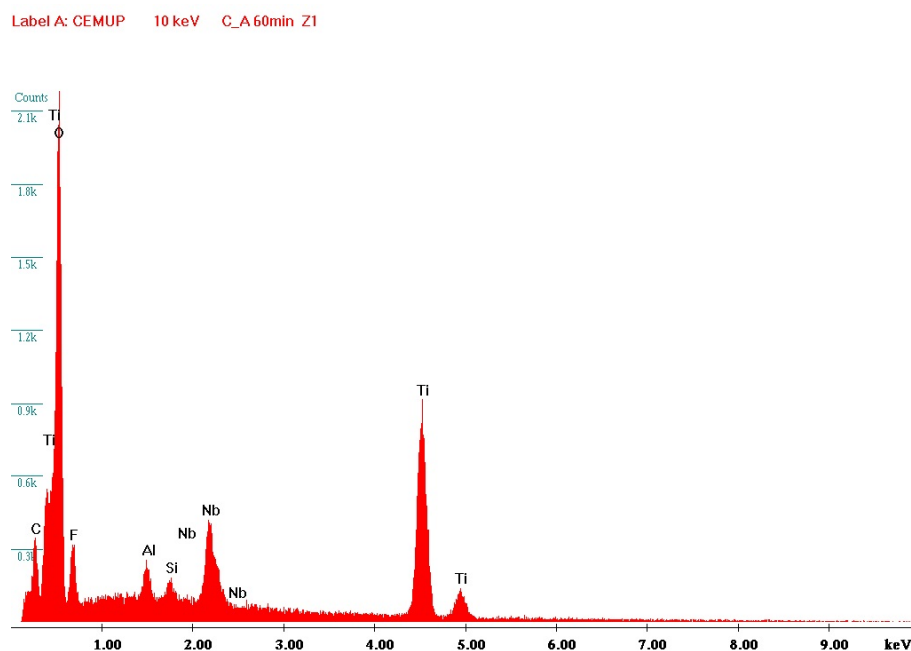


Fig. 5.16: Espectro da alheta da turbina  $C_A$  maquinada durante 60 minutos na zona Z1

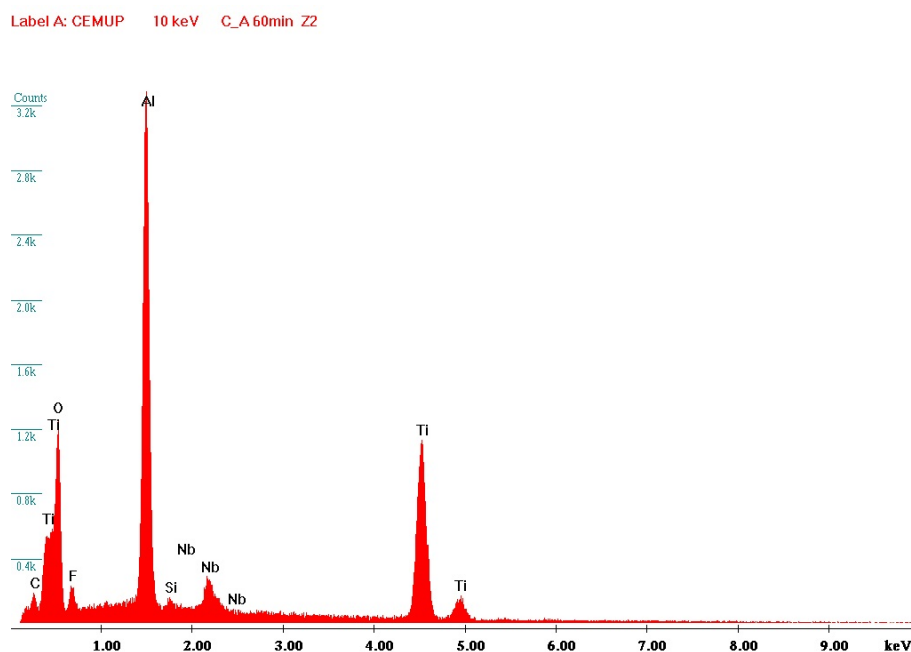


Fig. 5.17: Espectro da alheta da turbina  $C_A$  maquinada durante 60 minutos na zona Z2

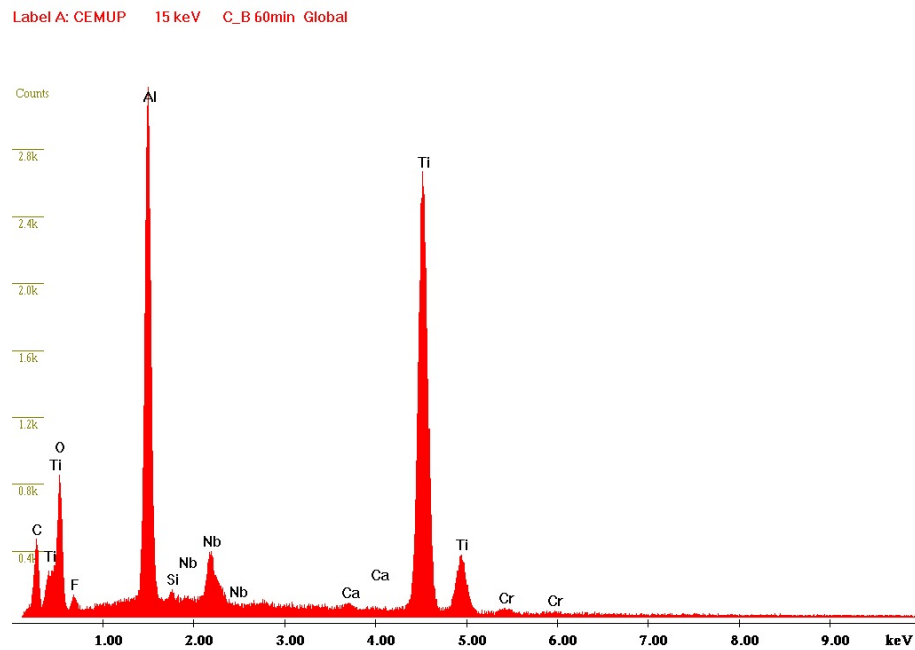


Fig. 5.18: Espectro global da base da turbina  $C_B$  maquinada durante 60 minutos

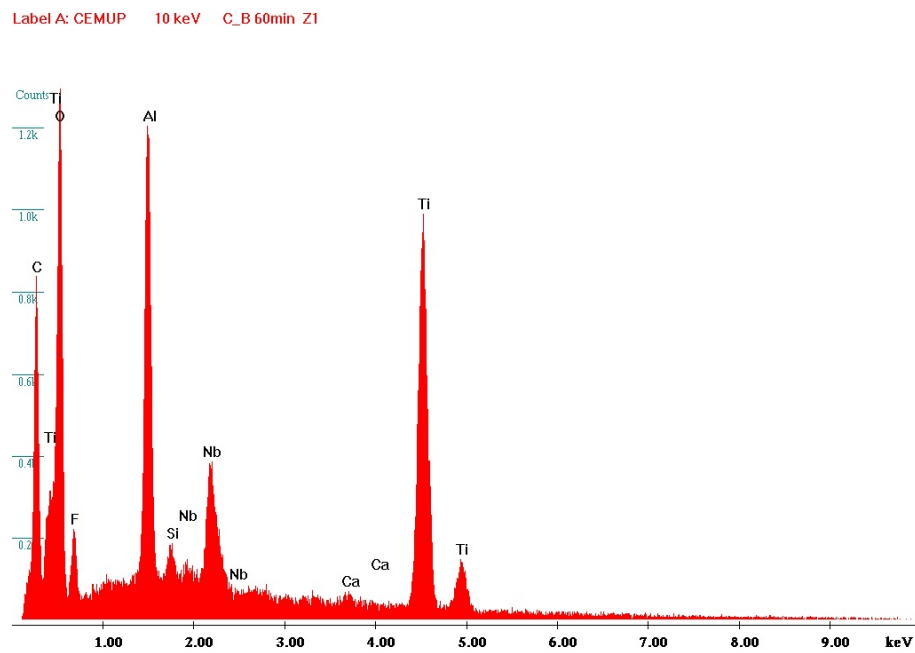


Fig. 5.19: Espectro da base da turbina  $C_B$  maquinada durante 60 minutos na zona Z1



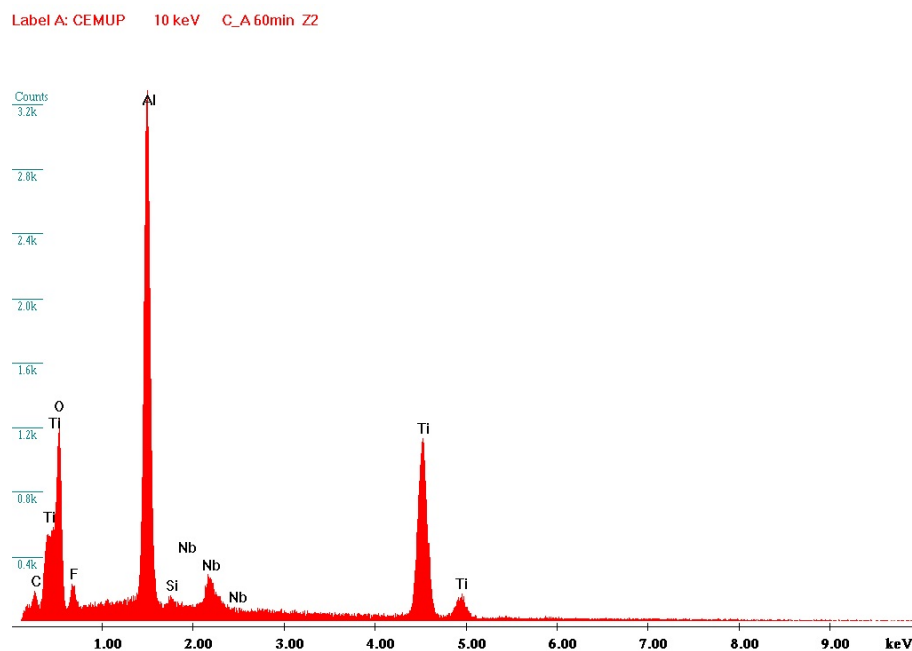


Fig. 5.20: Espectro da base da turbina  $C_B$  maquinada durante 60 minutos na zona Z2

## 5.4 Anexo D - Ensaios de rugosidades

O presente anexo apresenta os perfis de rugosidade das turbinas submetidas à solução 1 e solução 2.

### 5.4.1 Perfis de rugosidade das turbinas maquinadas quimicamente com a solução 1

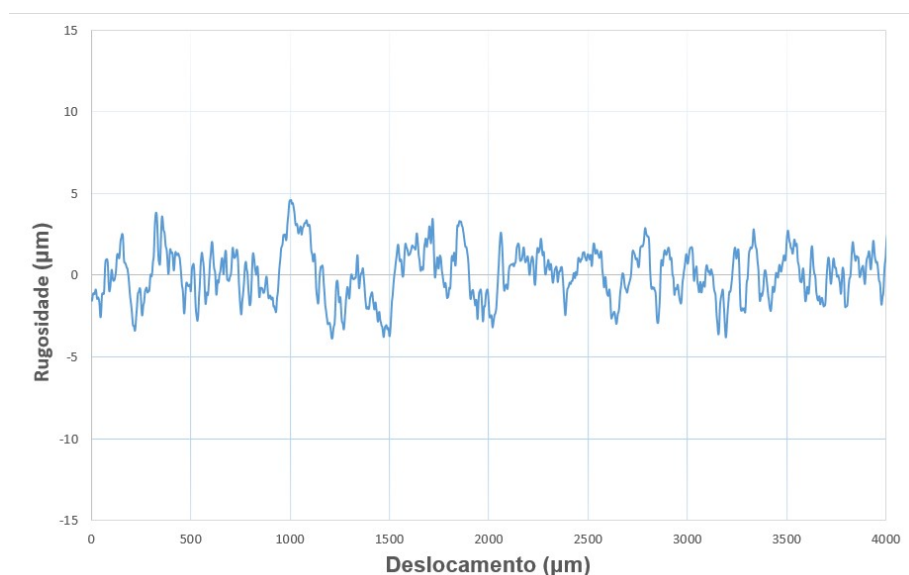


Fig. 5.21: Perfil de rugosidade da alheta da turbina B1 antes do processo de MQ

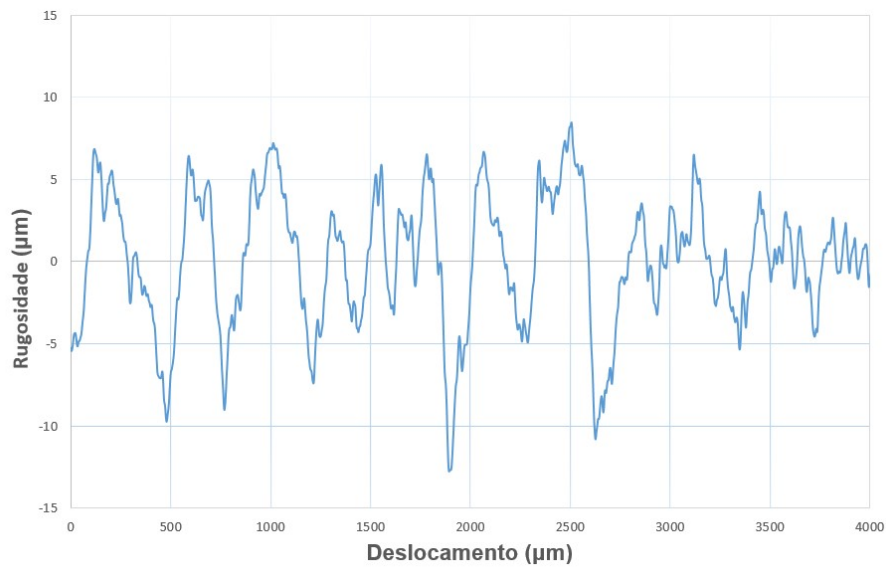


Fig. 5.22: Perfil de rugosidade da alheta da turbina B1 após 40 minutos de MQ

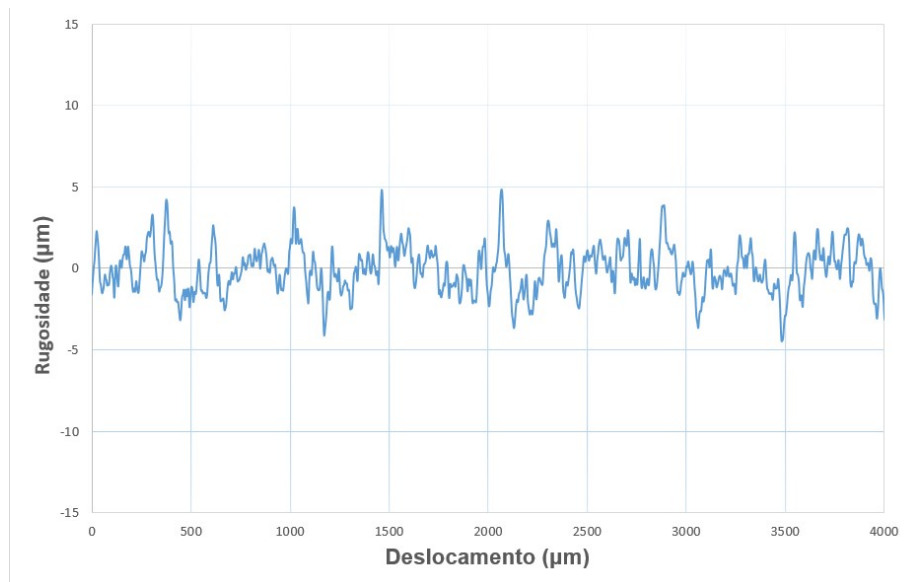


Fig. 5.23: Perfil de rugosidade da alheta da turbina C1 antes do processo de MQ

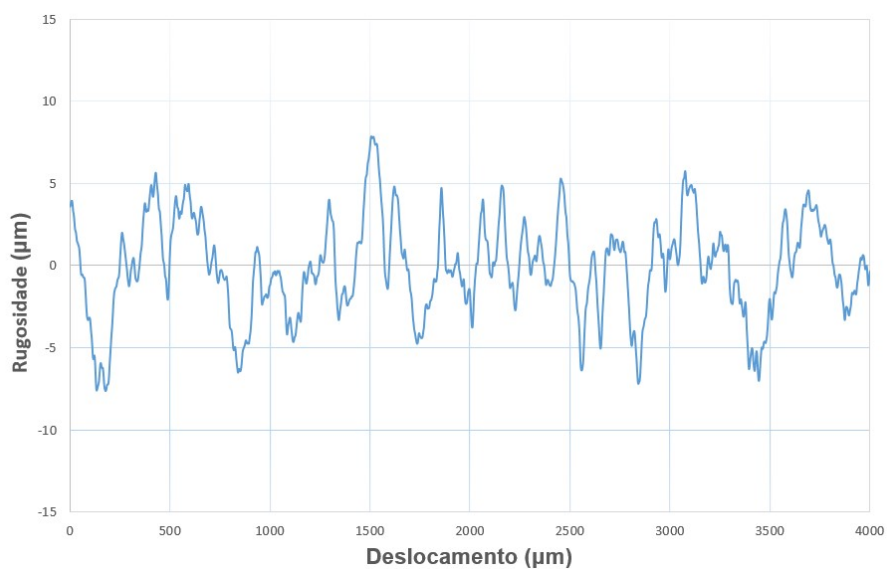


Fig. 5.24: Perfil de rugosidade da alheta da turbina C1 após 40 minutos de MQ

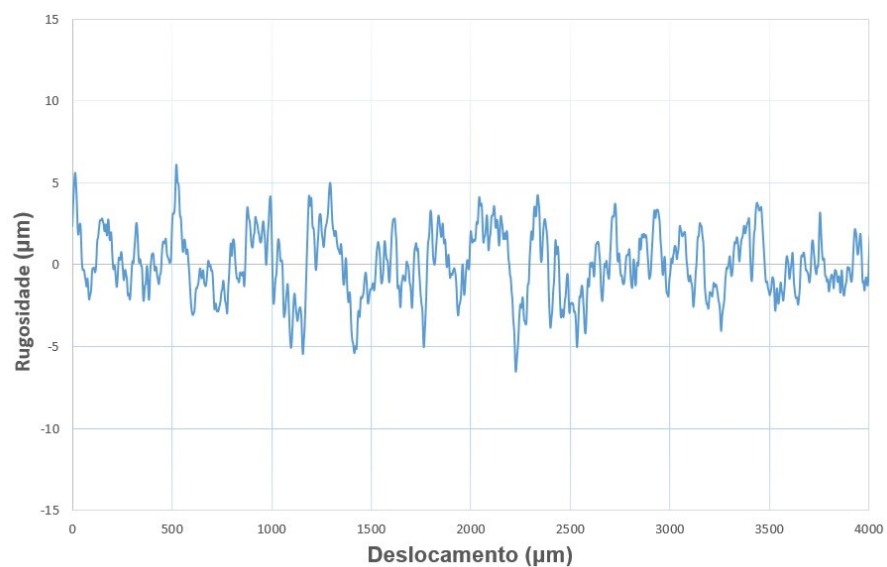


Fig. 5.25: Perfil de rugosidade da alheta da turbina B2 antes do processo de MQ

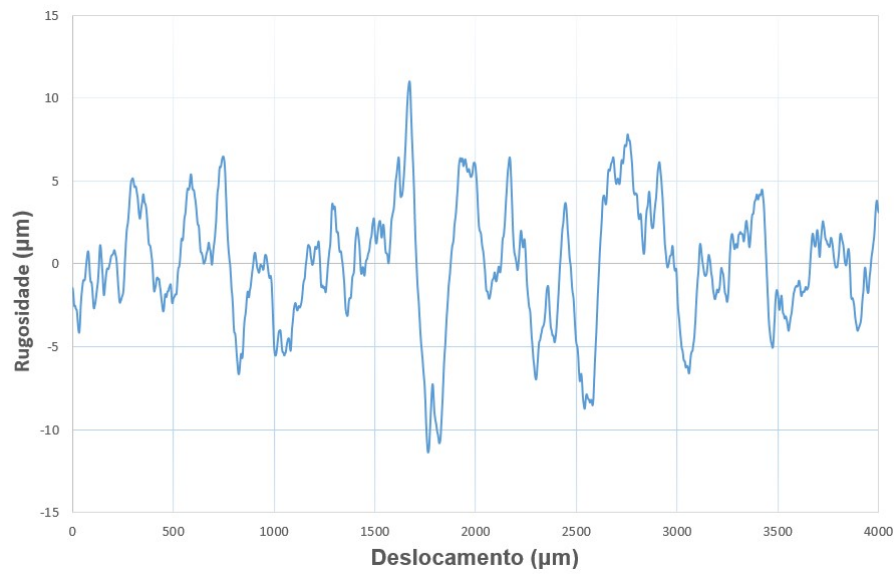


Fig. 5.26: Perfil de rugosidade da alheta da turbina B2 após 50 minutos de MQ

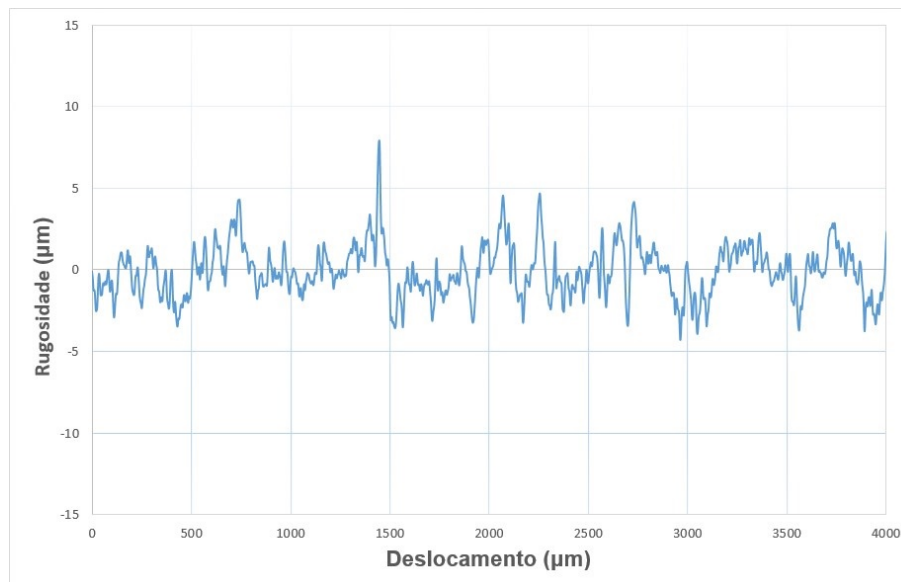


Fig. 5.27: Perfil de rugosidade da alheta da turbina C2 antes do processo de MQ

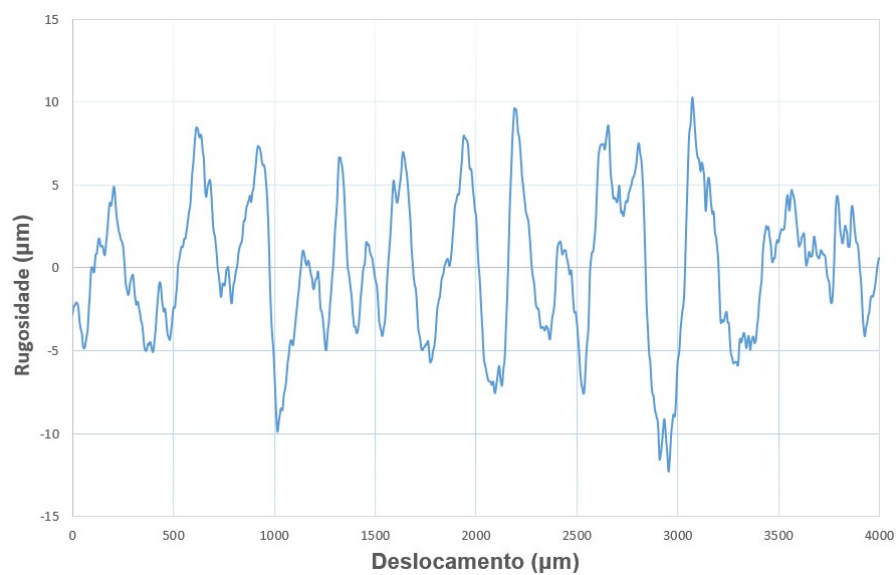


Fig. 5.28: Perfil de rugosidade da alheta da turbina C2 após 50 minutos de MQ

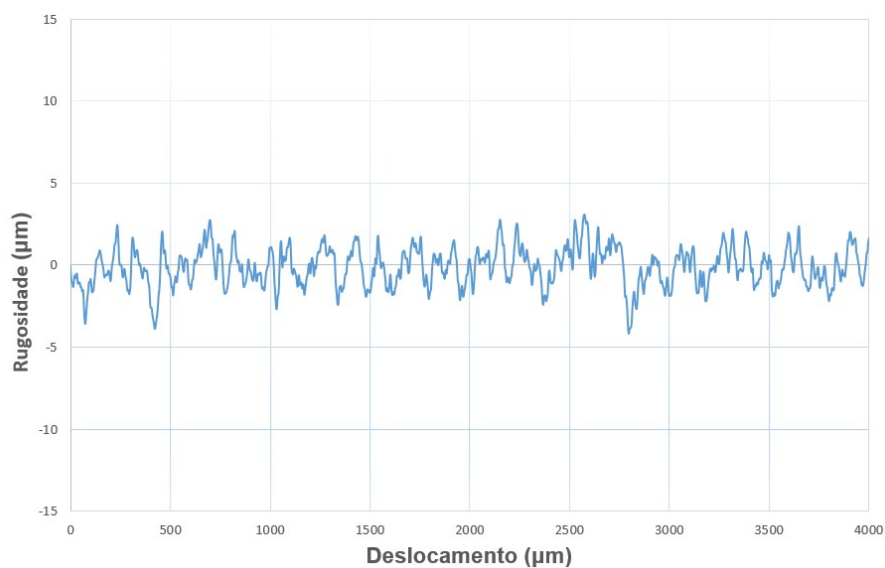


Fig. 5.29: Perfil de rugosidade da alheta da turbina A3 antes do processo de MQ

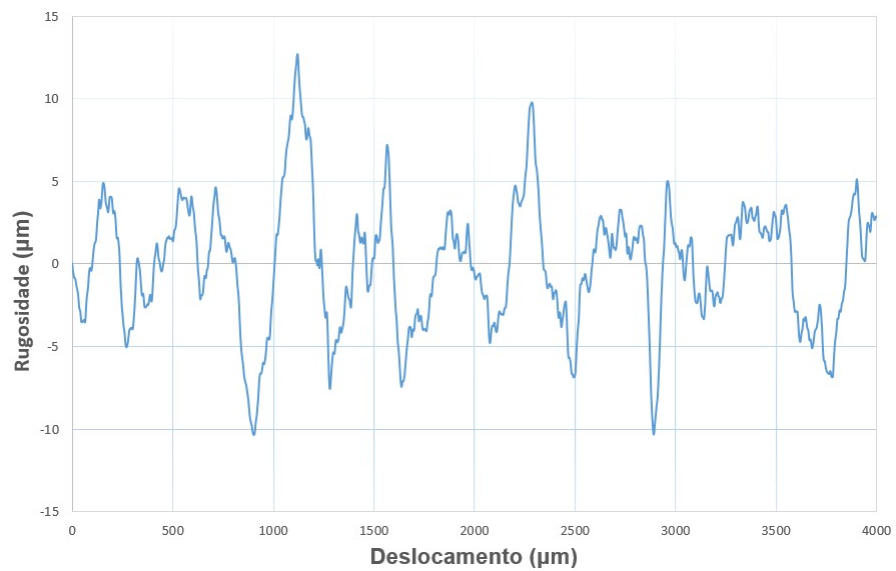


Fig. 5.30: Perfil de rugosidade da alheta da turbina A3 após 60 minutos de MQ

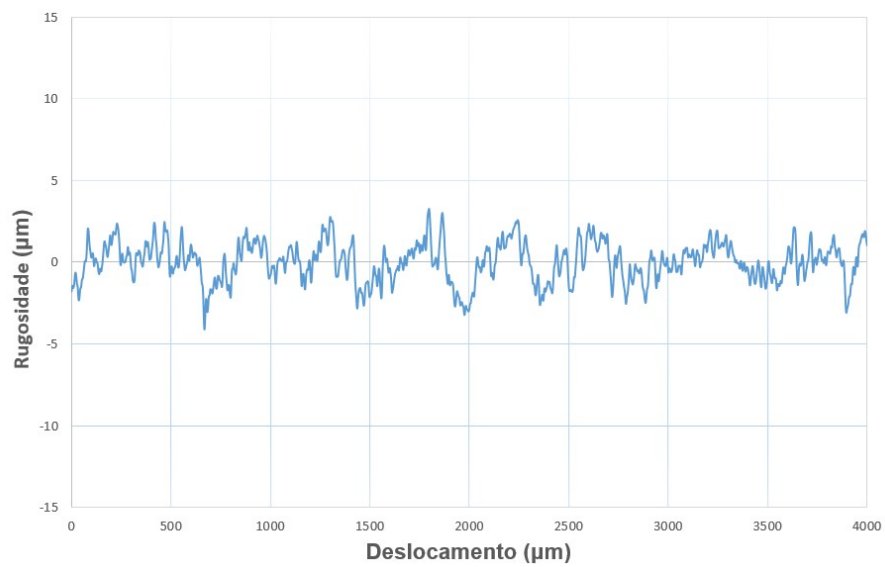


Fig. 5.31: Perfil de rugosidade da alheta da turbina B3 antes do processo de MQ

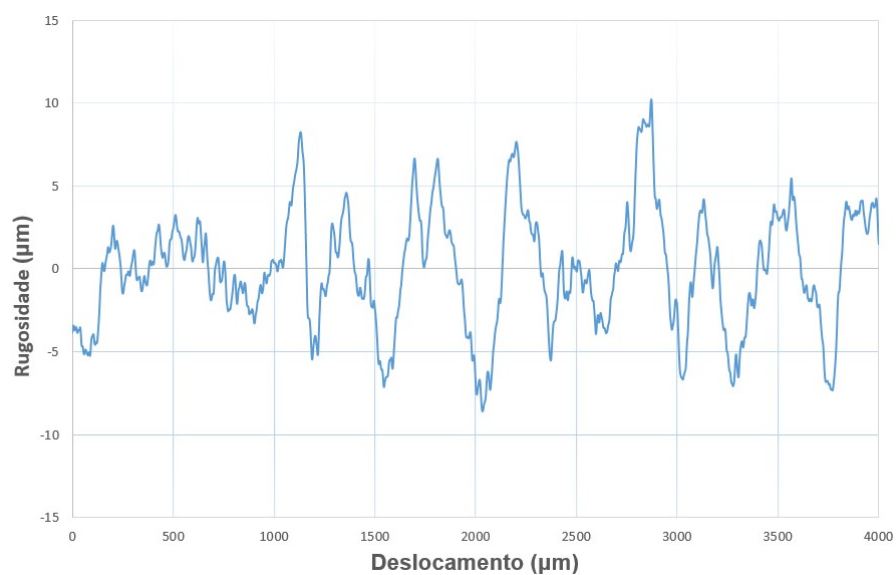


Fig. 5.32: Perfil de rugosidade da alheta da turbina B3 após 60 minutos de MQ

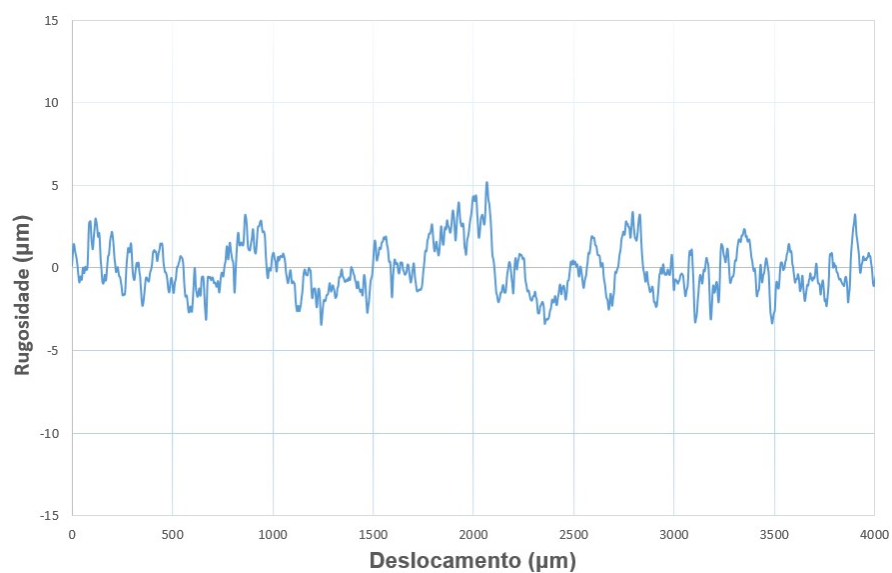


Fig. 5.33: Perfil de rugosidade da alheta da turbina C3 antes do processo de MQ



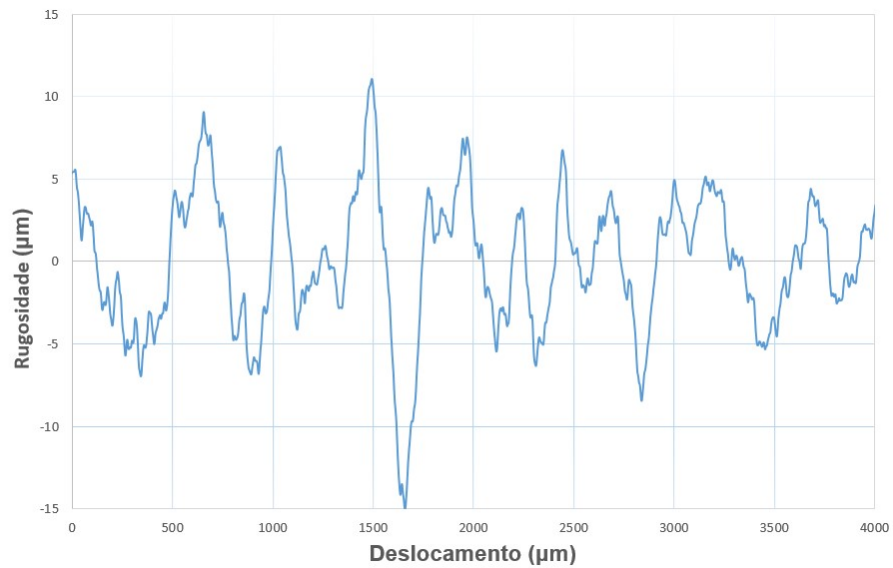


Fig. 5.34: Perfil de rugosidade da alheta da turbina C3 após 60 minutos de MQ

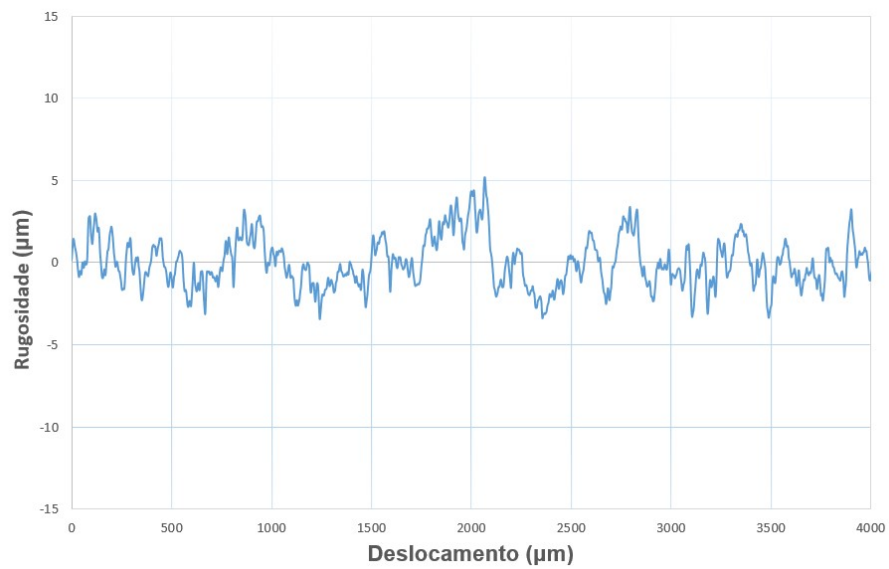


Fig. 5.35: Perfil de rugosidade da alheta da turbina A4 antes do processo de MQ

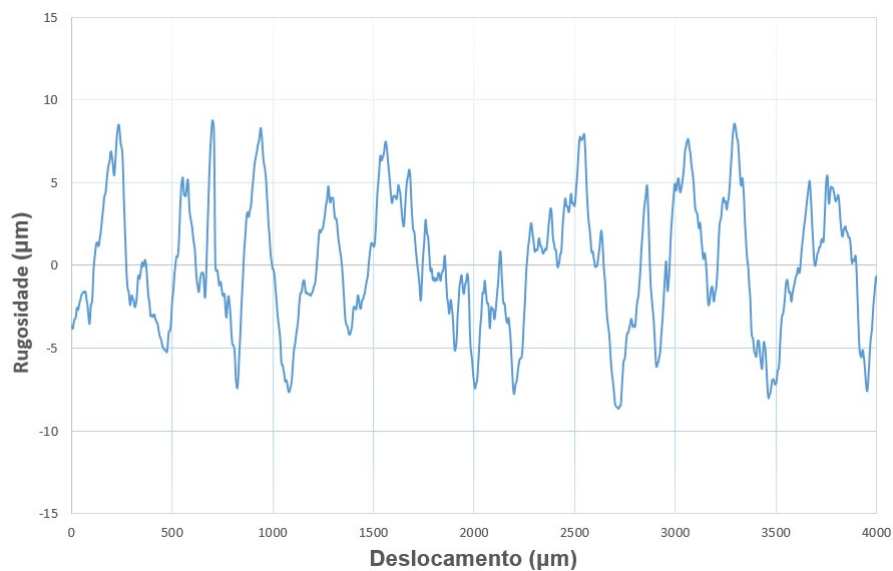


Fig. 5.36: Perfil de rugosidade da alheta da turbina A4 após 60 minutos de MQ

#### 5.4.2 Perfis de rugosidade das turbinas maquinadas quimicamente com a solução 2

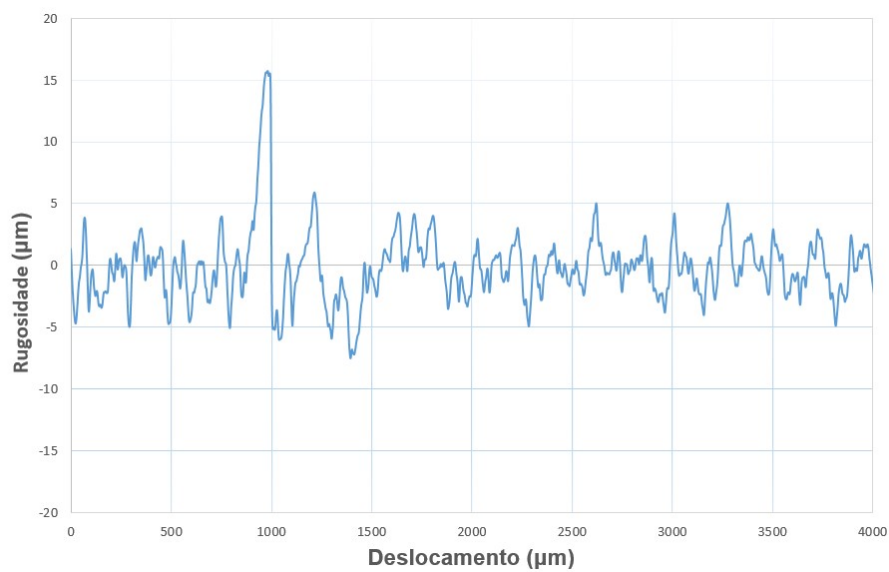


Fig. 5.37: Perfil de rugosidade da alheta da turbina 1 antes do processo de MQ

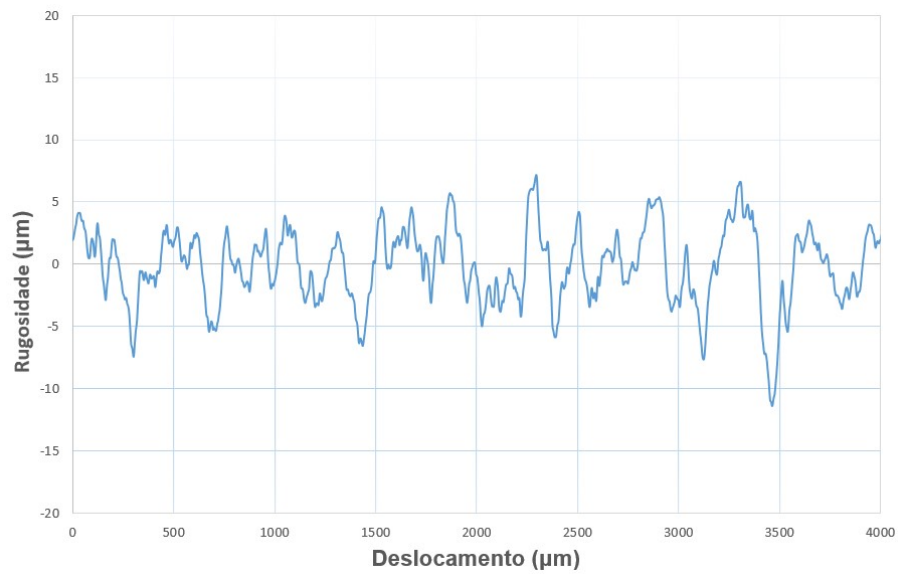


Fig. 5.38: Perfil de rugosidade da alheta da turbina 1 após 40 minutos de MQ

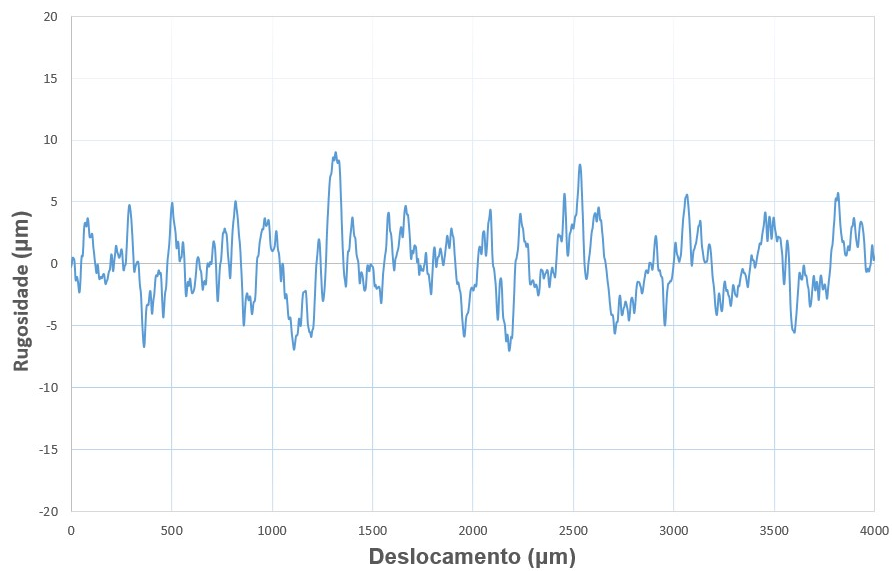


Fig. 5.39: Perfil de rugosidade da alheta da turbina 2 antes do processo de MQ

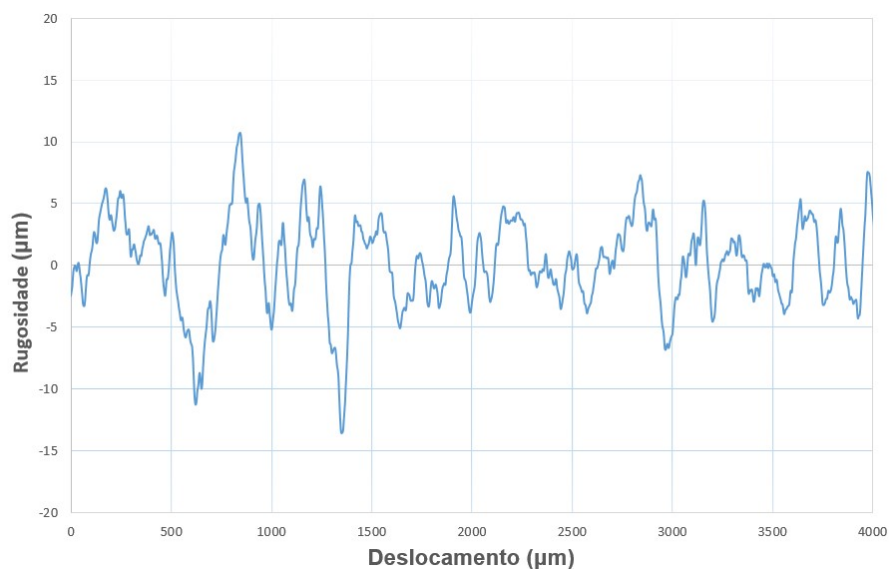


Fig. 5.40: Perfil de rugosidade da alheta da turbina 2 após 40 minutos de MQ

## 5.5 Anexo E - Ficha técnica do aço de construção CK45

O presente anexo apresenta a ficha técnica do aço de construção de norma DIN CK45 da F.Ramada.



## FICHA TÉCNICA DO AÇO

Marca: F10N

Cor: branco-preto-branco

Designação: Aço construção não ligado

Cópia Não Controlada

### 1 ⇒ QUALIDADE E NORMAS EQUIVALENTES

Num. Do Material	EURONORM	AISI	AFNOR	DIN
1.1191	C45E	1045	C 45 E	CK45

### 2 ⇒ ESTADO DE FORNECIMENTO:

Normalizado  
 $R_m \geq 560 \text{ MPa}$   
 $R_{0,2} \geq 275 \text{ MPa}$   
 $A \geq 16 \%$

### 3 ⇒ COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Elemento Químico (%)	C	Si	Mn	P	S
Máximo	0,50	0,40	0,80	0,035	0,035
Mínimo	0,42	-	0,50	-	-

### 4 ⇒ CERTIFICADOS AÇOS (segundo a norma EN 10204:2004)

2.1- Certificado de conformidade	○
2.2- Relatório de ensaio	⊙
3.1- Certificado de inspeção (+)	⊙

(+) Em casos especiais quando previamente acordado

### 5 ⇒ CERTIFICADOS DE TRATAMENTO TÉRMICO

Relatório de ensaio	⊙
Relatório de ensaio específico	⊙
Certificado de inspeção (+)	⊙

(+) Em casos especiais quando previamente acordado

Elaborado por:  
D1008-0

Aprovado Por: José Oliveira

Revisão: 01

Data de emissão: 23-04-2007

## 5.6 Anexo F - Catálogo dos componentes *HASCO*

Apresentam-se os casquilhos e pinos escolhidos do catálogo da empresa *Hasco* destinados ao molde projetado em 3.2.2.

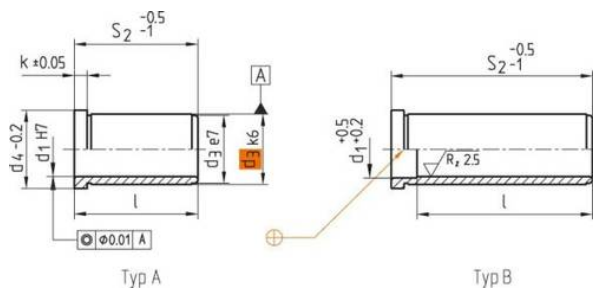
## 5.6.1 Casquilho Z11/22/10

27/12/2014

Casquillo guía Z 11 / Componentes generales de molde / Normalizados Z / Normalizados / Productos / HASCO - Hasco

**HASCO®**  
Enabling with System.

Casquillo guía Z 11



Nº pedido	S2 [mm]	d1 [mm]	k [mm]	d4 [mm]	d3 [mm]	l [mm]	Typ [mm]	Nº material
Z 11 / 17/18	17	18	6	31	26	17	1	57487
Z 11 / 17/20	17	20	6	31	26	17	1	57495
Z 11 / 17/22	17	22	6	35	30	17	1	57509
Z 11 / 17/24	17	24	6	35	30	17	1	57517
Z 11 / 22/9	22	9	3	16	14	22	1	57525
Z 11 / 22/10	22	10	3	16	14	22	1	57533
Z 11 / 22/12	22	12	6	23	18	22	1	57541

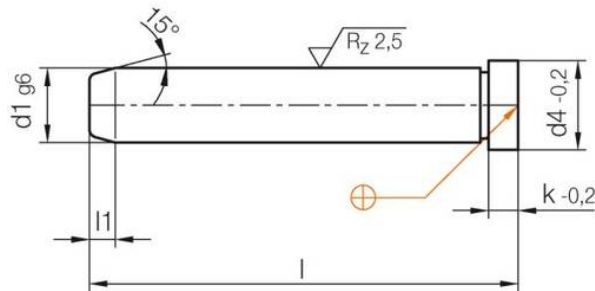
## 5.6.2 Pino Z01/10x60

27/12/2014

Columna guía Z 01 / Componentes generales de molde / Normalizados Z / Normalizados / Productos / HASCO - Hasco

**HASCO®**  
Enabling with System.

Columna guía Z 01



Nº pedido	d1 [mm]	l [mm]	k [mm]	d4 [mm]	l1 [mm]	d2 [mm]	l3 [mm]	l4 [mm]	Nº mate
Z 01/9x40	9	40	3	12	4	M5	10	15	Z0497
Z 01/9x60	9	60	3	12	4	M5	10	15	20497
Z 01/9x80	9	80	3	12	4	M5	10	15	20497
Z 01/9x100	9	100	3	12	4	M5	10	15	20497
Z 01 / 9X120	9	120	3	12	4	-	-	-	5340
Z 01/10x40	10	40	3	12	4	M6	10	15	20497
Z 01/10x60	10	60	3	12	4	M6	10	15	20497
Z 01/10x80	10	80	3	12	4	M6	10	15	20497

[http://www.hasco.com/es/content/view/products\\_product\\_variants/17594](http://www.hasco.com/es/content/view/products_product_variants/17594)

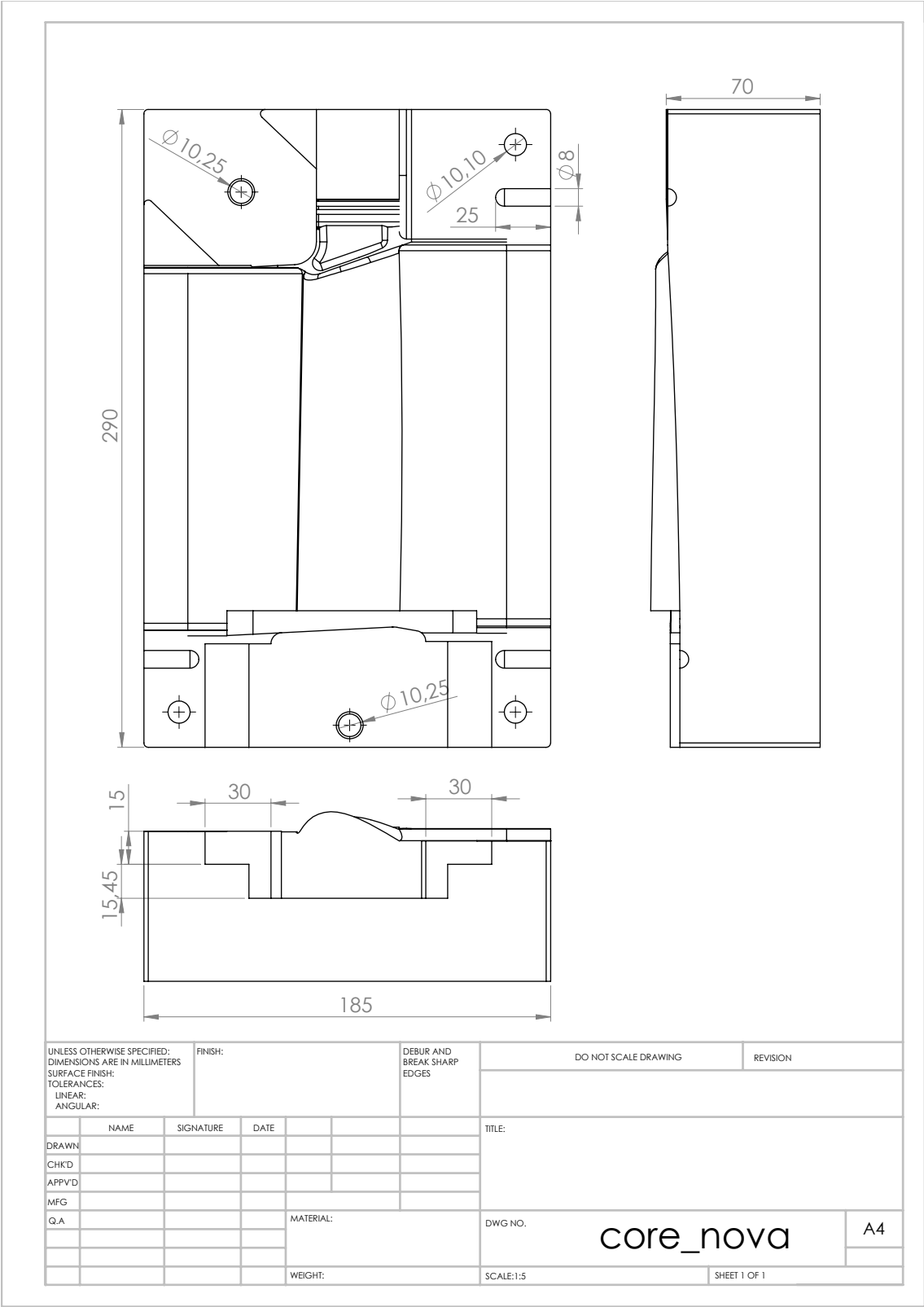
1/1

## 5.7 Anexo G - Desenhos de conjunto dos moldes projetados

O presente anexo apresenta os desenhos de conjunto dos moldes da pá de turbina projetados em alumínio e estereolitografia.

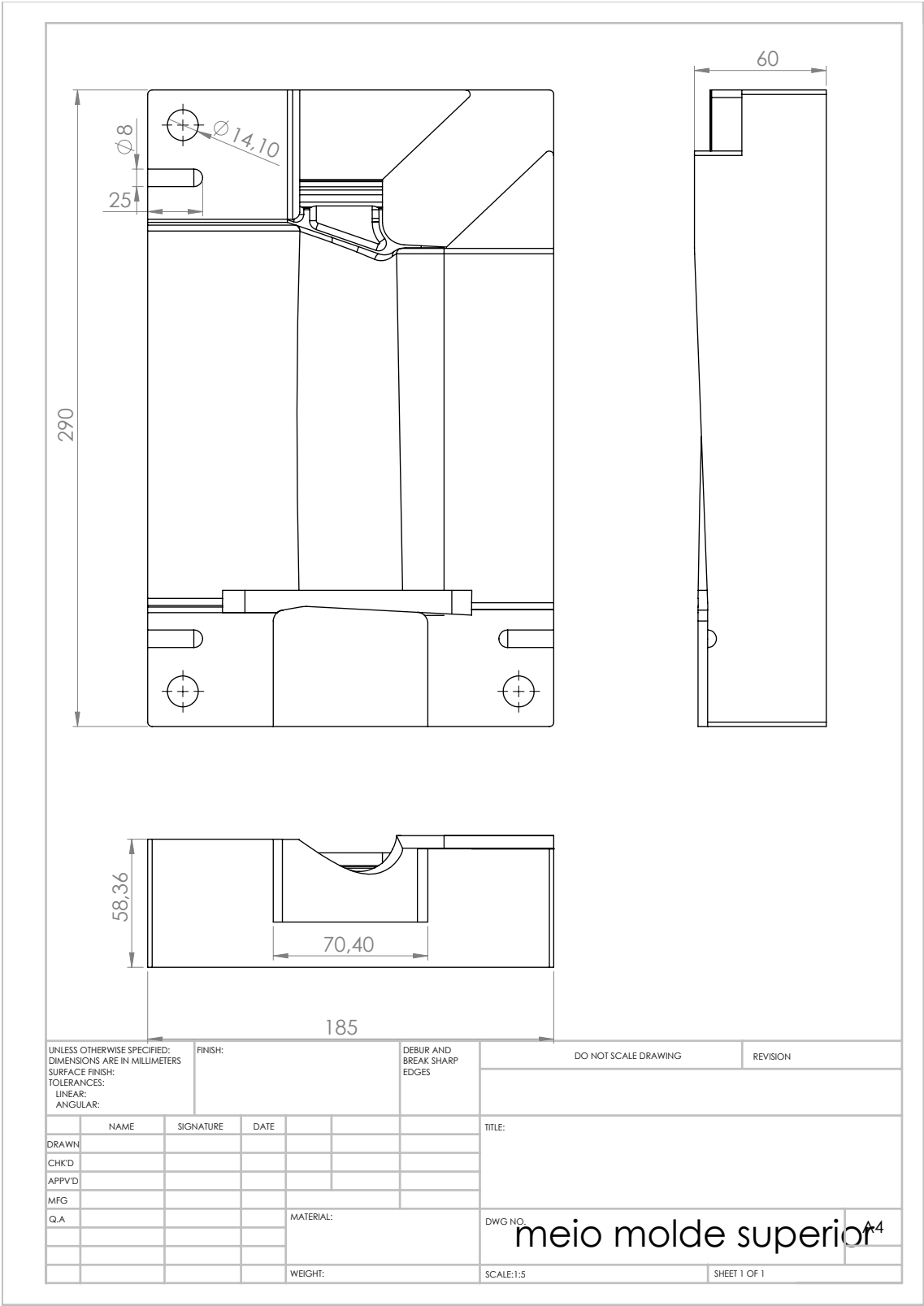
5.7.1 Molde da pá de turbina em alumínio

5.7.1.1 Meio molde inferior





5.7.1.2 Meio molde superior



Technical drawing of a mechanical part, labeled "macho-1". The drawing includes three views: a front view, a side view, and a top view. Dimensions are provided in millimeters.

**Front View Dimensions:**

- Overall width: 90,40
- Overall height: 63,81
- Radius of the top edge: R2

**Side View Dimensions:**

- Width: 34,11
- Height: 15,30

**Top View Dimensions:**

- Width: 17
- Height: 15
- Radius of the top edge: R5

**Table 1: Revision History**

REVISION	DATE	DESCRIPTION
1		

**Table 2: Drawing Information**

NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE
DRAWN			
CHKD			
APPVD			
MFG			
Q.A			

**Table 3: Material and Weight**

MATERIAL	WEIGHT

**Table 4: Drawing Details**

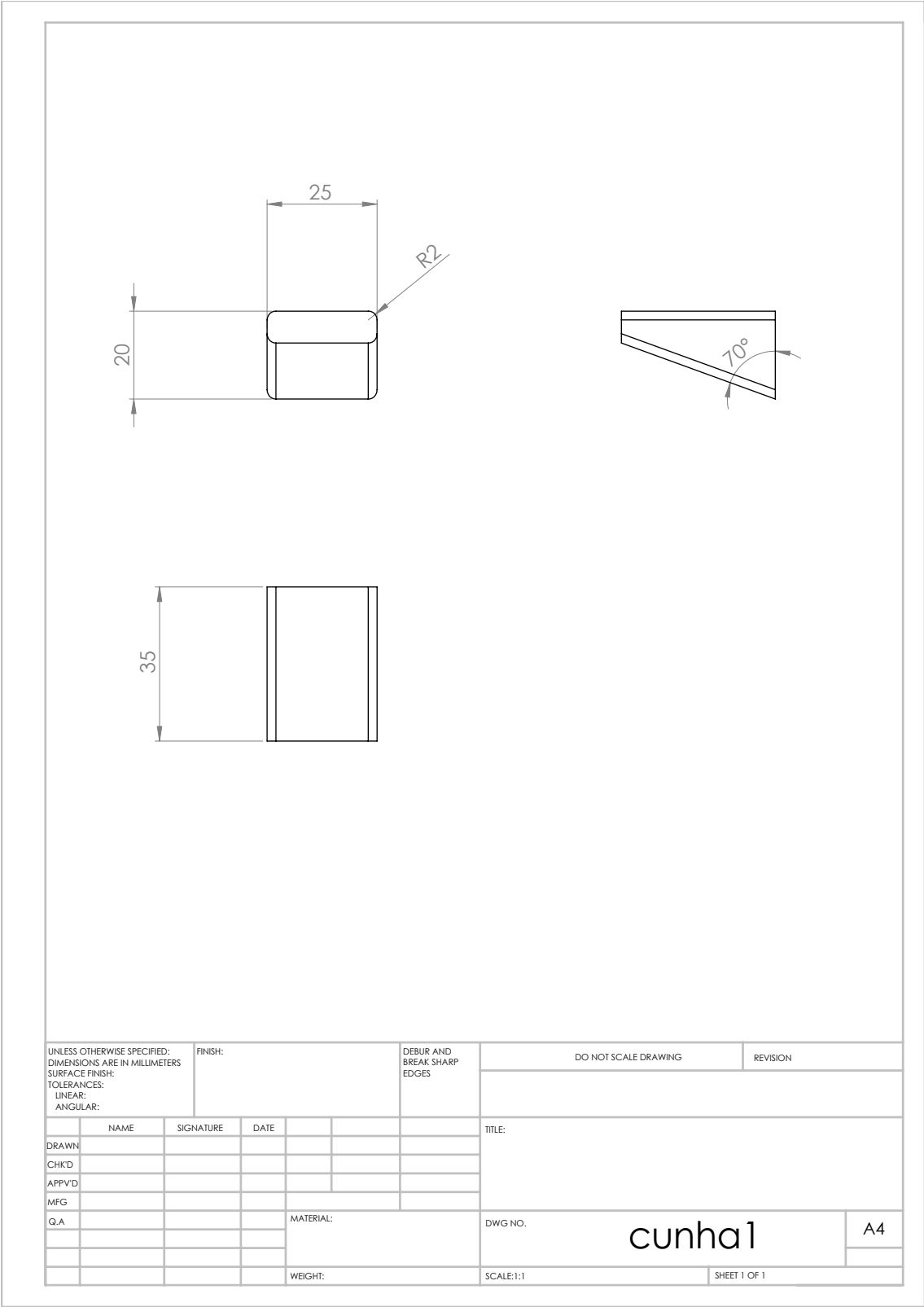
DWG NO.	SCALE	SHEET
	1:2	1 OF 1

**Table 5: Part Identification**

PART NAME	QUANTITY
macho-1	



5.7.1.5 Cunha 1



CAPÍTULO 5. ANEXOS





